

---

**Галимов Г. К.**

# **ЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ**

**Том I**

**АНТЕННЫ-СВЯЗЬ  
НПК**

**2010**

УДК 622.396.967  
Г 15  
ББК 32.845

Книга издается в авторской редакции и за счет средств автора.

Поставка книг по заказу по этому адресу: [gergal@yandex.ru](mailto:gergal@yandex.ru)

**Г 15**    **Галимов Г. К.** Зеркальные антенны. Том I. — М.: «Авансед Солюшнз», 2010. — 204 с.  
**ISBN 978-5-904269-20-3**

Сдано в набор 22.06.2010. Подписано в печать 19.08.2010.  
Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл.-печ. л. 25,5. Тираж 300 экз. Заказ 4480.

ООО «Авансед Солюшнз»  
105120, Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.

ISBN 978-5-904269-20-3



УДК 622.396.967  
ББК 32.845

ISBN 978-5-904269-20-3

© Галимов Г.К., 2010  
© Оформление «Авансед Солюшнз», 2010

## О ТЕРМИНАХ И ОПРЕДЕЛЕНИЯХ

В настоящее время, начиная со 2-й мировой войны, появилось огромное количество разработок и публикаций по зеркальным антеннам, которые стали самым распространенным типом антенн в мире — чуть ли не на каждом доме можно видеть зеркальные антенны спутниковой связи. Соответственно разработано множество типов антенн и антенных устройств и никаких ГОСТов не придумано для того, чтобы все они имели четкие и единообразные названия (жаль, что никто не додумался параболические антенны называть антеннами Архимеда!). Выбор тех или иных названий определяется в основном личными пристрастиями их авторов и отсутствием технической регламентации.

Поэтому нам представляется целесообразным раз и навсегда разобраться с терминами и определениями, по крайней мере, для зеркальных и близких к ним антенн. Прежде всего, что такое апланат и какие антенны можно называть апланатическими. Слово "апланат", как и множество других терминов, образовано от греческих слов: "а" — отрицательная частица, "plane" — блуждание, отклонение, ошибка. Обычно этот термин связывают с именем выдающегося ученого-оптика — Э. Аббе, который, работая в лаборатории К. Цейса, занимался объективами для микроскопов и фотоаппаратов, для которых он использовал условие синусов как условие отсутствия аберрации комы после того, как он поступил в лабораторию К. Цейса в 1872 г., и его работы не имеют никакого отношения к тому условию синусов, которое применяется к расчету антенн для случая фокусировки на бесконечность (в оптической терминологии). Отдавая дань исторической справедливости, следует помнить, что название "апланат" было дано впервые Хуго Штайн-Хайлем своему объективу в 1866 г. для созданного им фотообъектива из 2-х пар линз (рис. 1), который отличался тем, что в нем впервые исправлена сферическая аберрация и кома. Насколько известно, свой объектив он создал чисто эмпирически, не опираясь на научную теорию безаберрационных объективов. Эту теорию впоследствии как раз и использовал Э. Аббе в форме условия синусов для преломляющих сред. Реализация этого условия для телескопических зеркальных систем (к которым относятся и зеркальные антенны) используется при

расчете апланатических антенн. Таким образом, несмотря на то, что "апланат" это есть имя собственное для конкретного объектива, созданного другим человеком в более раннее время, апланатами стали называть впоследствии все оптические системы, удовлетворяющие условию синусов, а точнее системы, свободные от комы.

Теперь, что касается таких терминов, как "сканер Шварцшильда", "антенна Шварцшильда" и "телескоп Шварцшильда".

Шварцшильд получил уравнение профилей двухзеркальных предфокальных апланатов. Но, поскольку оптические зеркала, строго соответствующие условию синусов, реализовать невозможно, он от строгих формул перешел к более приближенному путем разложения в ряд. В этом случае, ограничиваясь первыми членами ряда, можно показать, что апланатический телескоп можно реализовать с помощью коникоид. В качестве достаточно случайного примера он рассмотрел предфокальную систему из двух гиперболических зеркал (рис. 266, а), не особенно заботясь о конструктивной оптимальности этой схемы, так как перед ним не стояла задача создания реального телескопа. **Шварцшильд никогда никакого реального телескопа ни прямо, ни косвенно не создал!** Согласно электронной еврейской энциклопедии, его основные научные интересы были обращены не в сторону астрономической оптики, а в сторону астрономической физики. Так, он сотрудничал с Эйнштейном в плане теории относительности и занимался проблемами "черных дыр".

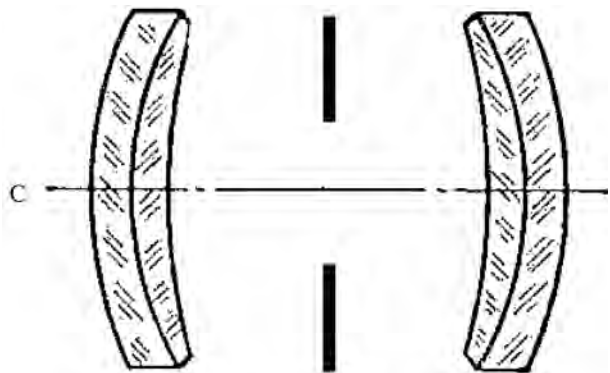


Рис. 1

Таким образом, "телескопа Шварцшильда" в природе нигде и никогда не существовало, и этот термин, а также тем более такие термины как "антенна Шварцшильда" и "сканер Шварцшильда" не более чем историческое заблуждение! А был ли мальчик!?

Часто используются такие понятия, как "Апланатическая антенна по схеме Кассегрена" или "по схеме Грегори", а между тем схема Кассегрена это парабола плюс гипербола, а схема Грегори это парабола плюс эллипс. Профили реальных антенных апланатов не имеют ничего общего с этими кривыми, и поэтому гораздо более адекватными и простыми будут термины соответственно — предфокальный апланат и зафокальный апланат.

Не менее запутанной является ситуация с самим условием синусов, но об этом мы поговорим в соответствующем разделе, посвященном теории аберраций.

Образцы совершенно некорректных терминов содержатся, например, в [15]. Статьи называются: одна "Моделирование офсетной двухзеркальной апланатической антенны типа Грегори", а другая статья "... типа Кассегрена". Наконец, приведем цитату из второй статьи: "Приводятся результаты исследования характеристик сканирования офсетной двухзеркальной **апланатической антенны типа Кассегрена (!?)** (несимметричной вырезки **из системы Шварцшильда (!?)**)".

Явно нельзя считать удачным сам термин "моделирование", т. к. моделирование в русском языке означает процесс создания упрощенного образца какого-либо устройства (самолета, радиотелескопа...) часто в уменьшенном виде, но создать уменьшенный образец "характеристик сканирования" — это под силу только Господу Богу! Да, пора разбираться с терминологией!

Таким образом, термин "антенны Шварцшильда" могут использовать только люди, незнакомые с историей оптических приборов и с реальным положением вещей. Поэтому нам представляется, что наиболее корректным является термин "апланатические" в греческом понимании этого слова (без искажений) при строгом выполнении условия синусов. Справедливости ради следует отметить, что многие хорошо скорректированные объективы и оптические телескопы были достаточно близки к выполнению этого условия, в том числе телескопы Ричи—Кретьена и Максудова.

Теперь что касается термина "металловоздушные и геодезические линзы", поскольку они часто используются вместе с зеркальными антеннами, и здесь наблюдается такая же неразбериха с названиями. Если параболический цилиндр ограничить двумя параллельными металлическими плоскостями, расположенными перпендикулярно его образующим, то получим сегментно-

параболическую антенну (рис. 2). Разновидностей такого типа антенн довольно много, но все они представляют собой систему из параллельных металлических поверхностей, между которыми распространяется поле ТЕМ (вектор  $E$  перпендикулярен металлическим поверхностям). При этом траектории всех лучей (в приближении лучевой оптики) таковы, что расстояния между двумя точками на одном луче минимальны — геодезические линии. В ряде источников

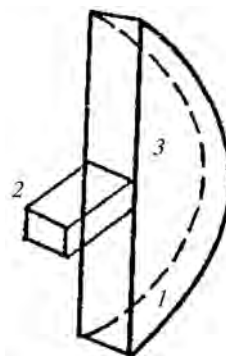


Рис. 2

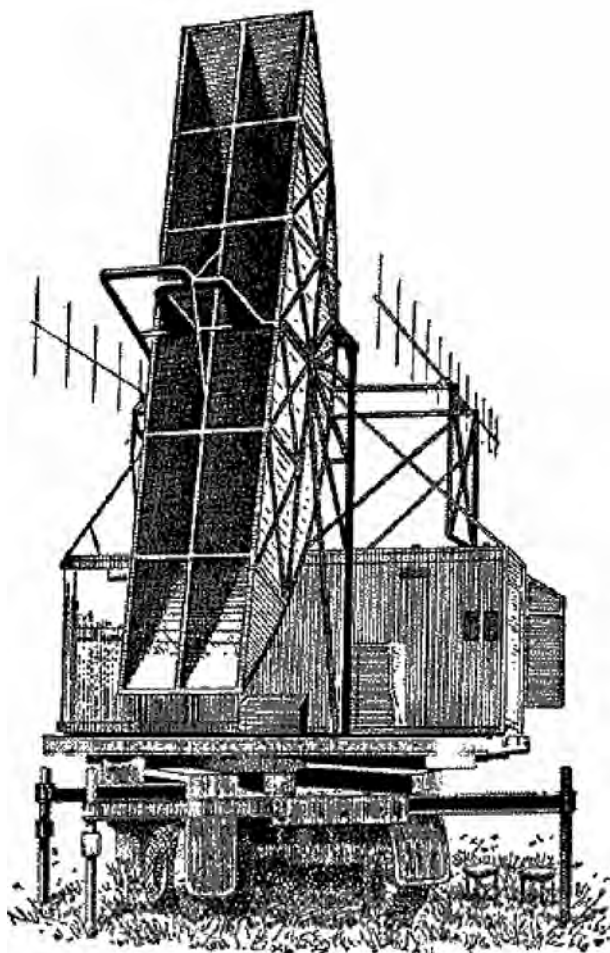


Рис. 2, а

устройства по типу рис. 2 называются либо металловоздушными, либо геодезическими линзами. Применение таких терминов совершенно не соответствует существу дела: линза это устройство, в котором формирование лучей происходит за счет преломления на границе диэлектрика. Ни в одной из так называемых металловоздушных и геодезических линз преломления лучей нет в принципе. Все антенны по типу рис. 2 по существу являются пространственными волноводами без боковых стенок, а так как их назначение состоит в том, чтобы формировать параллельные пучки лучей, т. е. коллимация, то наиболее адекватным понятием в данном случае является термин волноводный коллиматор. Кстати, по схеме рис. 2 был создан практически первый радиолокатор 2-й мировой войны, показанный на рис. 2, а. Локаторы такого типа были установлены вдоль всего побережья Англии для защиты от немецких бомбардировщиков в разгаре битвы за Англию.

И в заключение обратимся к термину "сканер", который ни с того, ни с сего вдруг начинает применяться к металловоздушным линзам — сканер Фостера, Шварцшильда, Льюиса и т. д. [3]. Слово "Scan" с английского переводится как просматривать, пробегать глазами. Сканирование это процесс, а сканер это, по крайней мере,

подвижное устройство, связанное только с облучателем и обеспечивающее его перемещение по некоторому закону, и один и тот же облучатель (рупор, вибратор, ...) со своей системой сканирования может облучать множество различных антенн. Поэтому методологически следует четко различать такие понятия как волноводный коллиматор, металловоздушная линза или геодезическая линза или сканер, поскольку все эти сканеры Фостера, Льюиса и т. п. просто соответствующие разновидности волноводных коллиматоров.

На наш взгляд, термин "многозеркальные антенны" тоже не совершенен, т. к. одиночная антенна практически никогда не имеет больше двух зеркал, и применять к ней термин "многозеркальная", по крайней мере, некоторая чрезмерность — согласитесь, что 2 зеркала не так уж и много. Действительно, многозеркальными являются некоторые радиотелескопы, собранные из большого количества зеркальных антенн, но это уже совсем другое дело. Поэтому термин "многозеркальные" к одиночным антеннам в дальнейшем не будет применяться.

Теперь, когда мы частично разобрались с терминологией, можно приступить к непосредственному изложению материала, опираясь на те основные соображения, которые изложены выше.

# ПАРАБОЛИЧЕСКИЙ ЦИЛИНДР И ВОЛНОВОДНЫЕ КОЛЛИМАТОРЫ

Формы зеркал бесконечно разнообразны, но их применение в антенной технике в настоящее время и в обозримом будущем ограничивается необходимостью решения практических задач радиолокации, радионавигации, радиоастрономии, телевидения и т. д. в основном в диапазоне СВЧ, а в перспективе в мм и световом диапазоне.

Если начинать от Адама, то стоит вспомнить, что история развития зеркальных антенн как таковых начинается с опытов Герца, Маркони, Тесла в конце 19-го и в начале 20-го веков. Герц использовал параболический цилиндр, облучаемый элементарным вибратором, расположенным вдоль фокальной линии цилиндра. Такая, с позволения сказать, конструкция, конечно, не может считаться антенной в современном

смысле слова. Здесь параболический цилиндр можно было с таким же успехом заменить плоским металлическим листом. Однако формально первой зеркальной антенной был параболический цилиндр с расположенным вдоль его фокальной оси облучателем. Поэтому мы и начнем с цилиндра — от простого к сложному. Как это ни странно, но в современных антеннах находят применение цилиндры самого разного вида и назначения. Здесь можно выделить, так сказать, "активные" цилиндры, которые целенаправленно участвуют в формировании ДН, и цилиндры "пассивные", которые влияют на ДН в силу своего часто неизбежного присутствия, как, например, цилиндрический корпус ракеты, фюзеляж самолета, антенная мачта и т. п., и на которые обычно не распространяются законы геометрической оптики, и их нельзя отнести к зеркальным антеннам.

Цилиндрические рефлекторы обычно имеют либо параболическую, либо круговую образующую, используются либо протяженные цилиндрические поверхности, либо их сегменты. Параболические цилиндры в составе РЛС обычно располагаются так, что их фокальная ось оказывается параллельной горизонтальной поверхности и вдоль этой оси размещается либо линейная решетка, либо раскрыт волноводного коллиматора. Рассмотрим особенности сканирования в параболическом цилиндре, когда сканирование осуществляется за счет создания линейного фазового распределения вдоль линейного источника, расположенного на фокальной линии цилиндра с фокусным расстоянием  $f$ . На рис. 3, а луч, выходящий из точки  $O$  линейного источника и образующий с ним угол  $\theta$ , отражается от параболического цилиндра в некоторой точке  $(x_1, y_1, z_1)$ . Уравнение плоскости, образующей угол  $\theta$  с горизонтом, имеет вид:  $z - sx + q = 0$ , где  $s = -\text{tg } \theta$ ,  $q$  — константа. Оптический путь  $d_1$  от точки  $O$  линейного источника до точки  $(x_1, y_1, z_1)$  параболического цилиндра равен  $d_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}$ . Добавляя  $x_1^2$  к обеим частям уравнения параболического цилиндра  $y_1^2 = 4f(x_1 + f)$ , получим

$$x_1^2 + y_1^2 = (2f + x_1)^2.$$

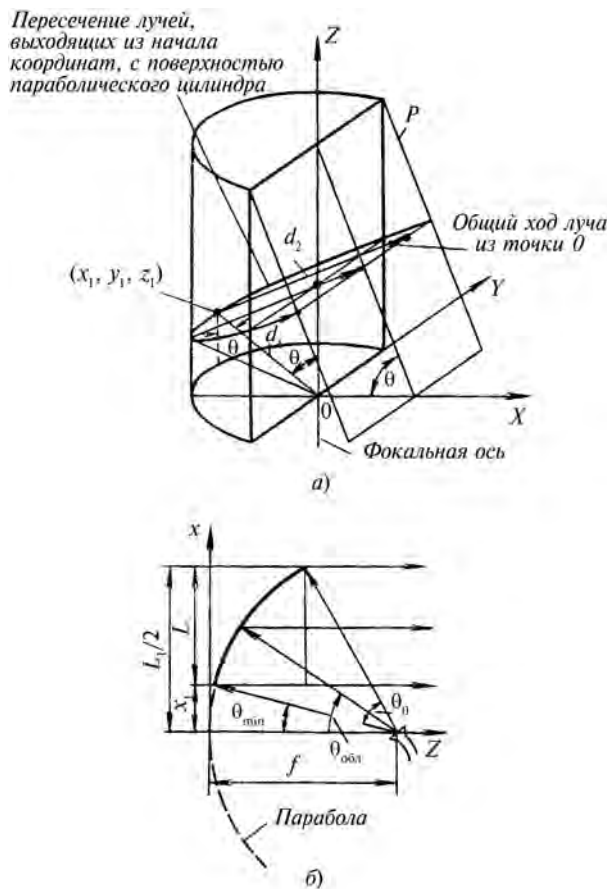


Рис. 3

Координаты точки на параболическом цилиндре связаны соотношением

$$z_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \operatorname{ctg} \theta = (x_1 + 2f) \operatorname{ctg} \theta,$$

откуда

$$d_1 = (x_1 + 2f) \operatorname{cosec} \theta.$$

Прямая, параллельная оси  $x$  и проходящая через точку  $(x_1, y_1, z_1)$ , пересекает плоскость  $P$  в точке  $(x_2, y_2, z_2)$ , где  $x_2$  определяется из уравнения

$$x_2 = \frac{z_1 + q}{s}.$$

Тогда длина перпендикуляра, опущенного из точки  $(x_1, y_1, z_1)$  на плоскость  $P$ , будет

$$d_2 = (x_2 - x_1) \sin \theta,$$

где перед  $x_1$  стоит знак минус, так как координата  $x_1$  отрицательна. Подставляя вместо  $z_1$  его выражение в уравнение для  $x_2$ , а выражение  $x_2$  в выражение для  $d_2$ , найдем

$$d_2 = -(x_2 \operatorname{cosec} \theta + 2f \cos^2 \theta \operatorname{cosec} \theta + q \cos \theta).$$

Суммарная длина пути от  $O$  до плоскости  $P$  будет

$$d = d_1 + d_2 = 2f \sin \theta - q \cos \theta.$$

Таким образом, все лучи, выходящие из некоторой точки линейного источника под углом  $\theta$  к нему и отражающиеся от поверхности параболического цилиндра, проходят до плоскости  $P$  одинаковый оптический путь. Это значит, что сканирование в плоскости образующей в цилиндрической антенне не сопровождается искажением диаграмм направленности, если сам облучатель располагается вдоль фокальной линии, а в процессе сканирования создается линейное распределение фаз вдоль облучателя.

Этот тип зеркальных антенн применяется в том случае, когда необходимо создать веерную диаграмму направленности с резко различной шириной лепестков в главных плоскостях, а также при необходимости осуществить линейное сканирование в достаточно широком секторе. Линейный облучатель помещается на фокальной линии и создает цилиндрическую волну.

В раскрые антенны имеем разделяющееся амплитудно-фазовое распределение

$$E(x, y) = A_1(x) A_2(y) e^{i\psi(y)},$$

где  $A_1(x)$  — амплитудное распределение в раскрые в плоскости профиля зеркала,  $A_2(y)$  — амплитудное распределение в раскрые вдоль образующей (совпадающее с распределением вдоль линейного облучателя);  $\psi(y)$  — фазовое распределение вдоль образующей.

Амплитудное распределение  $A_1(x)$  будет иметь вид

$$A_1(x) = \frac{F(\theta)}{\sqrt{r/f}} = F(\theta) \cos \frac{\theta}{2}.$$

Здесь  $F(\theta)$  — диаграмма направленности облучателя в плоскости профиля зеркала.

Так как амплитудно-фазовое распределение в раскрые антенны разделяющееся, то ДН в главных плоскостях определяются амплитудно-фазовым распределением в этих плоскостях:  $A_1(x)$ ,  $A_2(y)$ ,  $\psi(y)$ .

Рассмотрим особенности конструкции параболического цилиндра:

1) Вследствие синфазности поверхностных токов вдоль образующей (при синфазном излучателе) зеркало, в отличие от параболоида вращения, не делают перфорированным или решетчатым, так как это значительно увеличило бы заднее излучение.

2) Так как поле облучателя параболического цилиндра убывает к  $1/\sqrt{r}$ , то для уменьшения реакции зеркала на облучатель, а также для устранения теневого эффекта облучателя параболический цилиндр делают, как правило, несимметричным (рис. 3, б). Угол  $\theta_{\min}$  имеет величину  $2-10^\circ$ ; угол  $\theta_{\text{обл}}$  (направление максимума ДН облучателя) выбирают по-разному:

а) так, чтобы центральный луч прошел через середину раскрыва;

б) так, чтобы обеспечить совпадение максимума распределенного поля с серединой раскрыва;

в) так, чтобы поле краев зеркала имело одинаковое значение.

Значения  $\theta_{\text{обл}}$ , определенные любым из этих способов, отличались незначительно, и можно для расчета  $\theta_{\text{обл}}$  использовать следующее соотношение:  $\theta_{\text{обл}} = 2 \operatorname{arctg} [b(1 - \xi_1)/4]$ , где  $b = L_1/2f$ ,  $\xi_1 = 2x_1/L_1$ . Смысл входящих сюда величин ясен из рис. 3, б.

3) Облучатель несимметричного параболического цилиндра должен иметь более узкую ДН, чем в случае симметричного зеркала. Обычно несимметричные параболические цилиндры изготавливаются с углами раскрыва, не превышающими  $\theta = 90-120^\circ$ .

В качестве линейного облучателя чаще всего на практике используется раскрыв волноводного коллиматора или линейная решетка, как на рис. 4, а, б, в. Простейший волноводный коллиматор представлен на рис. 2; здесь 1 — параболическая лента, примыкающая с одной стороны к двум металлическим пластинам 3. В их раскрые располагается небольшой рупорный облучатель 2, направленный в сторону параболической ленты. Такой однослойный коллиматор, несмотря на свою простоту, находит широкое применение в РЛС, которые служат для обзора плоской поверхности, например, на кораблях

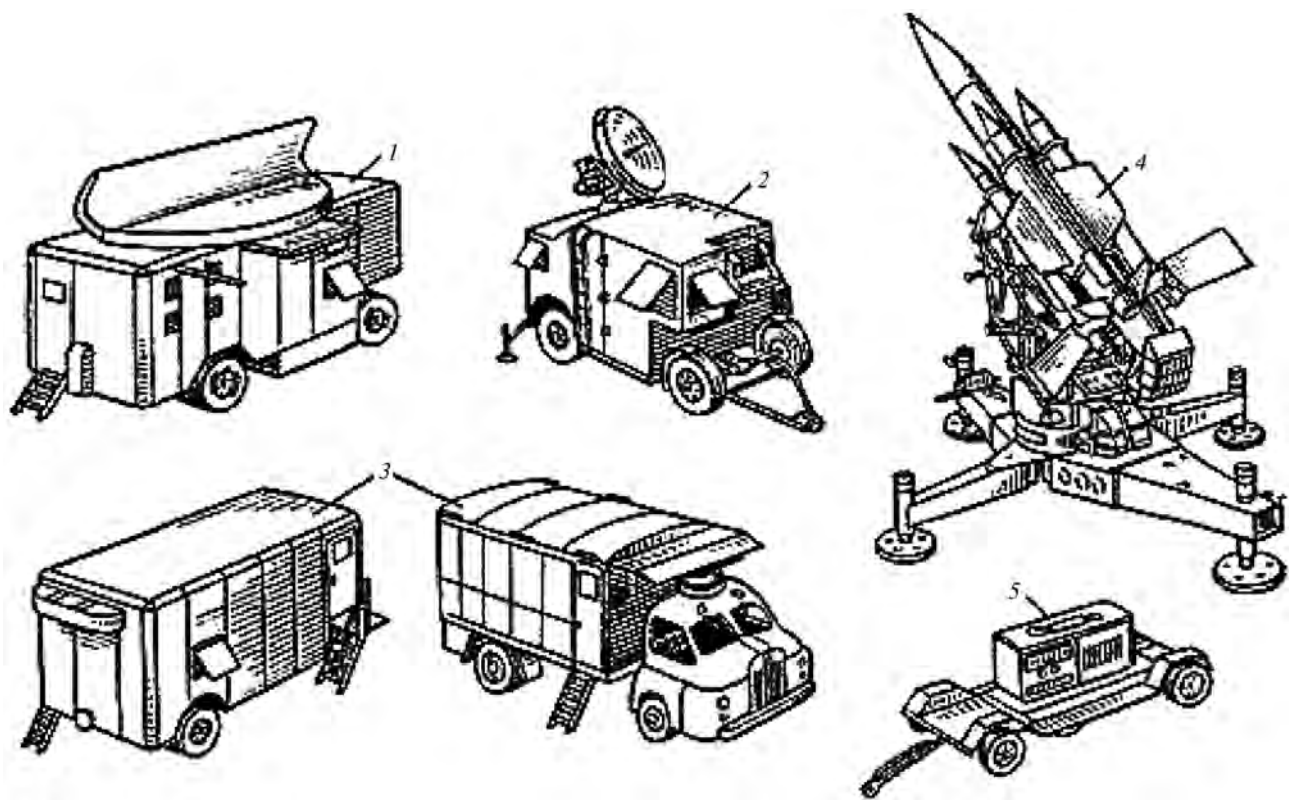


Рис. 4

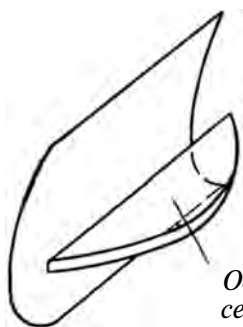


Рис. 4, а

Облучатель —  
сегментный параболоид

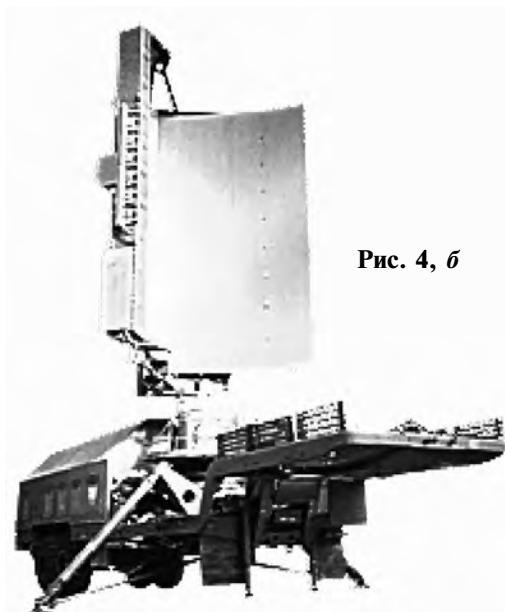


Рис. 4, б

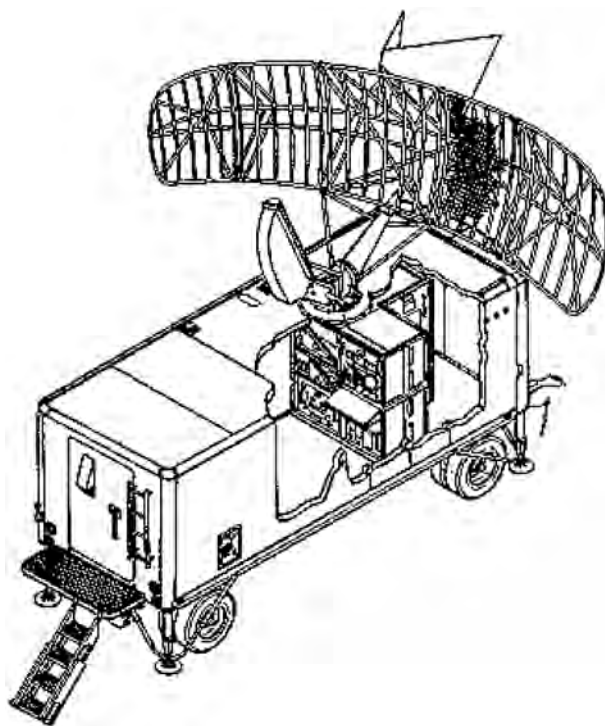


Рис. 4, в



для обнаружения других кораблей, айсбергов и т. п., а также для отслеживания береговой или ледовой кромки. В этих случаях требуется узкая ДН в горизонтальной плоскости, а в вертикальной плоскости ширина ДН не лимитируется (веерный луч), поскольку интересные объекты заведомо лежат в горизонтальной плоскости. Размеры антенн в горизонтальной плоскости определяют разрешающую способность РЛС, а в вертикальной плоскости расстояние между пластинами коллиматора берется меньше  $\lambda$ , чтобы не возникали высшие типы волн. В качестве облучателя обычно используется открытый конец волновода при соответствующем апертурном угле коллиматора. Вся антенна устанавливается на возвышенной части судна и вращается в горизонтальной плоскости в процессе обзора с не слишком большой скоростью, поскольку окружающая обстановка довольно стабильна.

Развитием однослойного плоского волноводного коллиматора является двухслойный коллиматор, схематически представленный на рис. 5. Во входном слое помещается облучатель, а выходной слой коллиматора заканчивается линейным раскрывом. Энергия облучателя распространяется внутри входного слоя и, переходя в выходной слой путем отражения от полукруглой задней стенки, концентрируется в почти плоскую волну, которая через раскрыв коллиматора излучается в свободное пространство. При этом сам раскрыв, как видно, выполнен в виде рупора, что позволяет регулировать ширину ДН в вертикальной плоскости. Достоинством двухслойной конструкции является то, что устраняется затенение раскрыва, как это имеет место в однослойной конструкции. Для устранения реакции задней стенки на облучатель можно прямой перегиб заменить тороидальным (рис. 6). Присущая данному коллиматору сферическая аберрация, связанная с полукруглой формой задней стенки, может быть уменьшена при помощи дополнительных линз. Определенным недостатком конструкции является большой радиус вращения облучателя ( $R/2$ ), если требуется сканирование ДН. Если же коллиматор используется в многолучевом режиме, то это не является недостатком, т. к. наличие нескольких неподвижных облучателей на фокальной дуге во входном слое не приводит к затенению раскрыва. Облучатели могут использоваться для одновременного или последовательного формирования независимых лучей. С помощью рассмотренного волноводного коллиматора может быть получен широкий сектор неискаженного сканирования — до  $\pm 50^\circ$ .

Двухслойный коллиматор может быть также построен по схеме двухзеркальной антенны, специально разработанной для широкоугольного сканирования, теория которых рассматривается в последующих разделах. На рис. 267 представлена схема такой антенны, а на рис. 7 соответ-

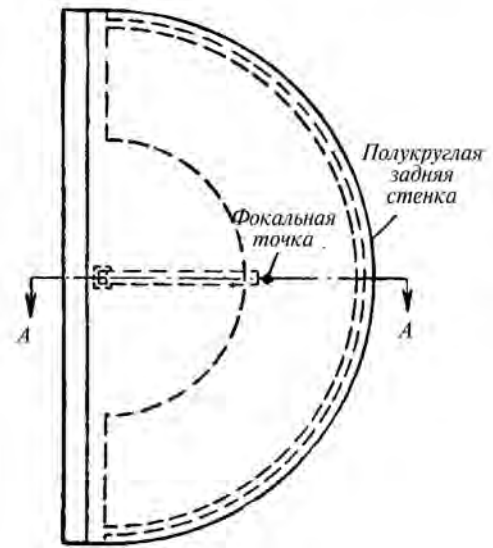
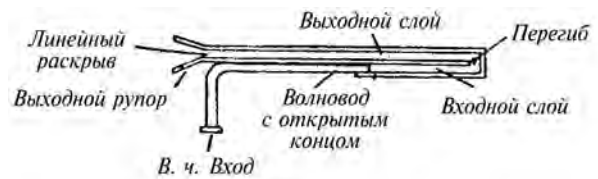


Рис. 5

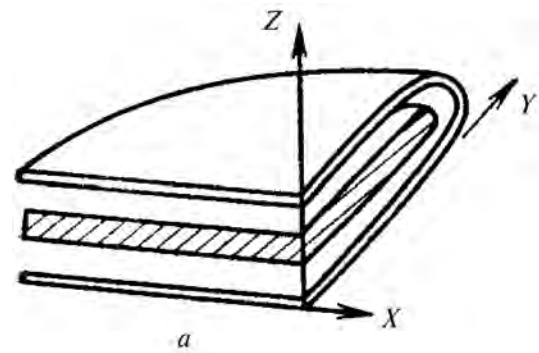


Рис. 6

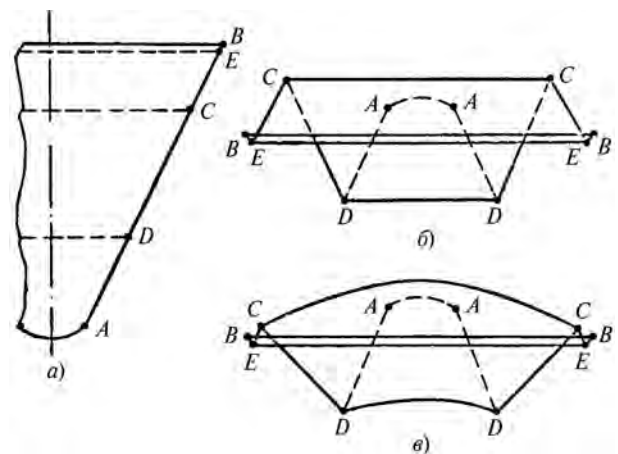


Рис. 7

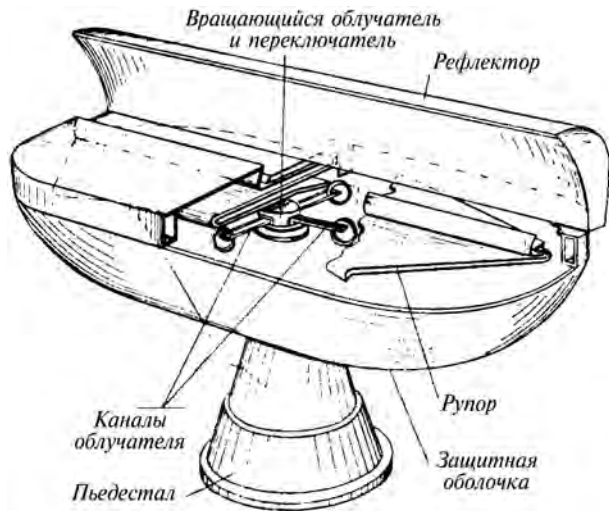


Рис. 8

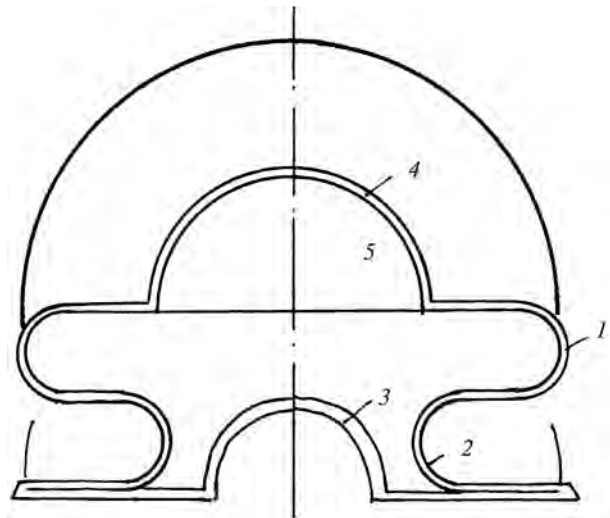


Рис. 10

ствующий волноводный коллиматор, который образован дважды изогнутыми параллельными пластинами. Форма тороидальных изгибов выбирается из условия отсутствия искажений при сканировании. Здесь изгиб *СС* соответствует вспомогательному зеркалу, а изгиб *ВВ* — главному зеркалу. Изгиб *АА* образован двумя цилиндрическими поверхностями и не вносит искажений в ход лучей, а служит лишь для изменения направления распространения поля и вводится для обеспечения компактности в том случае, когда данный коллиматор используется совместно с цилиндро-параболическим рефлектором. Рассмотренный волноводный коллиматор применялся в качестве антенны РЛС орудийной наводки береговых батарей. На рис. 8 представлено схематическое изображение этой антенны 3-сантиметрового диапазона. Здесь цилиндрический рефлектор использован для фокусировки энергии в угломестной плоскости. Ширина ДН составляет  $0,6^\circ$  в азимутальной плоскости и  $3^\circ$  в угломестной. Волноводный коллиматор возбуждается поочередно от четырех рупорных облучателей, которые включаются в соответствующие момен-

ты времени 4-канальным волноводным коммутатором. Облучающий узел вращается со скоростью 240 оборотов в минуту и вследствие этого ДН антенны сканирует в секторе  $10^\circ$  скоростью 16 циклов в секунду.

Рассмотрим далее еще один вариант коллиматора на основе двухзеркальной концентрической антенны, ход лучей в которой показан на рис. 403. Теория таких антенн будет рассмотрена в дальнейших разделах. Соответствующий концентрический волноводный коллиматор [13] в разрезе показан на рис. 9 и 10. На рис. 10 изгиб *1* соответствует главному зеркалу концентрической антенны, изгиб *2* — ее вспомогательному зеркалу, кривая *3* — дуга сканирования облучателя или системы облучателей, дуга *4* — выходной раскрыв коллиматора. Плоскость *5* используется для сужения ДН в вертикальной плоскости путем создания структуры, известной из теории антенн поверхностной волны. Возможен также вариант использования концентрического коллиматора в составе антенны "песочные часы" (рис. 11), в которой раскрыв коллиматора располагается по фокальной дуге *1*, а кривая *6* —

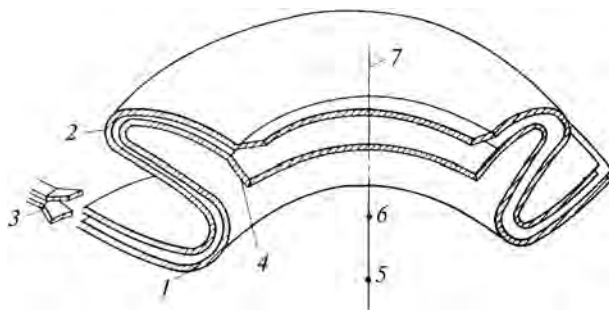


Рис. 9

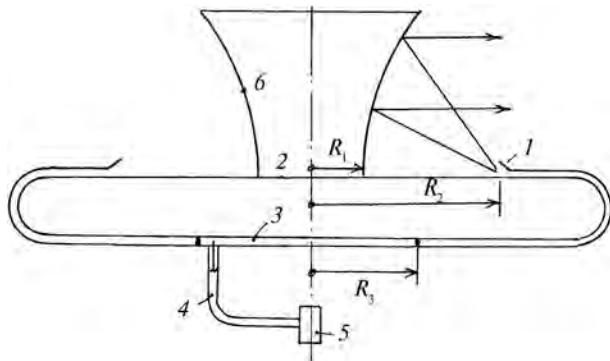


Рис. 11

парабола. Ход лучей в соответствующей двухзеркальной концентрической антенне показан на рис. 12. Видно, что облучатель располагается за центром кривизны зеркал. Сама по себе антенна, показанная на рис. 12, не представляет практического интереса, поскольку ее главное зеркало меньше вспомогательного, но в составе "песочных часов" эта особенность оказывается даже полезной, т. к. радиус кривизны дуги сканирования уменьшается и это весьма удобно с конструктивной точки зрения. Схема концентрического волноводного коллиматора с половинкой "песочных часов" показана на рис. 11. Здесь 1 — фокальная дуга "песочных часов" и одновременно образующая зеркала 1 двухзеркальной концентрической антенны, 2 — поперечное сечение шейки "песочных часов" и одновременно зеркало 2, 3 — вращающаяся часть коллиматора, к которой приделан рупор с коаксиальным возбуждателем (или волноводом) 4, 5 — вращающийся переход и механизм сканирования. Излучение рупора направлено в сторону оси, как показано на рис. 13.

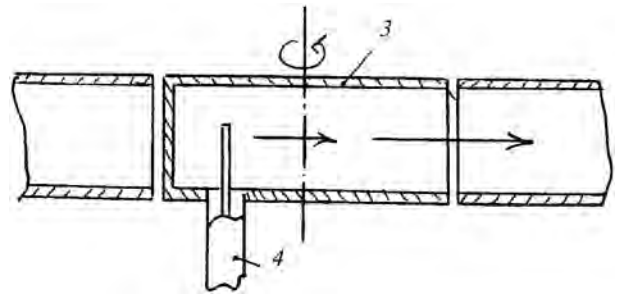


Рис. 13

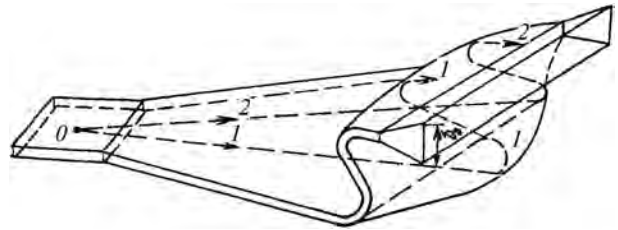


Рис. 14

На принципе двухзеркальной антенны может быть построен волноводный коллиматор для исправления фазовых искажений в раскрыве секториального рупора, как на рис. 14. Здесь изгибы металлических поверхностей выполняются таким образом, что путь вдоль луча 1, идущего от фазового центра до раскрыва по средней линии коллиматора, и путь вдоль любого другого луча, например луча 2, имеют одинаковую длину, что обеспечивает синфазное возбуждение раскрыва.

Обычно волноводный коллиматор является промежуточным звеном между облучателем и зеркальным рефлектором, причем система в целом обычно используется в РЛС со сканированием ДН как правило с очень большой скоростью — десятки и сотни циклов в секунду. С такой скоростью сами антенны в силу своих размеров и массы перемещаться не могут. Эта задача решается с помощью небольших по массе облучате-

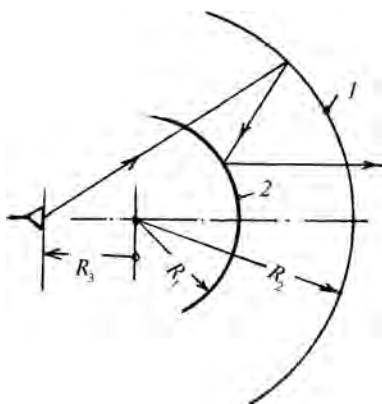


Рис. 12

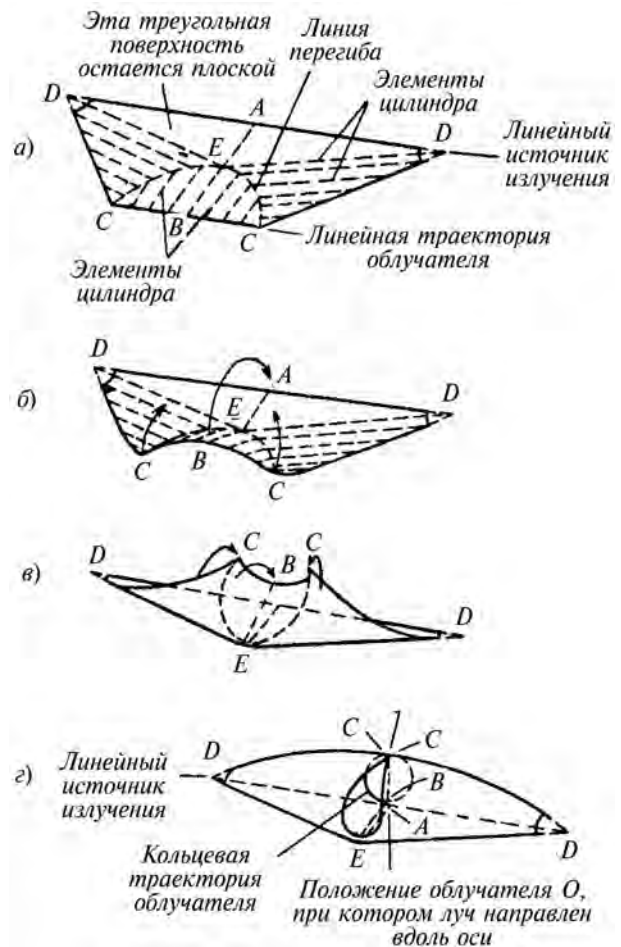


Рис. 15

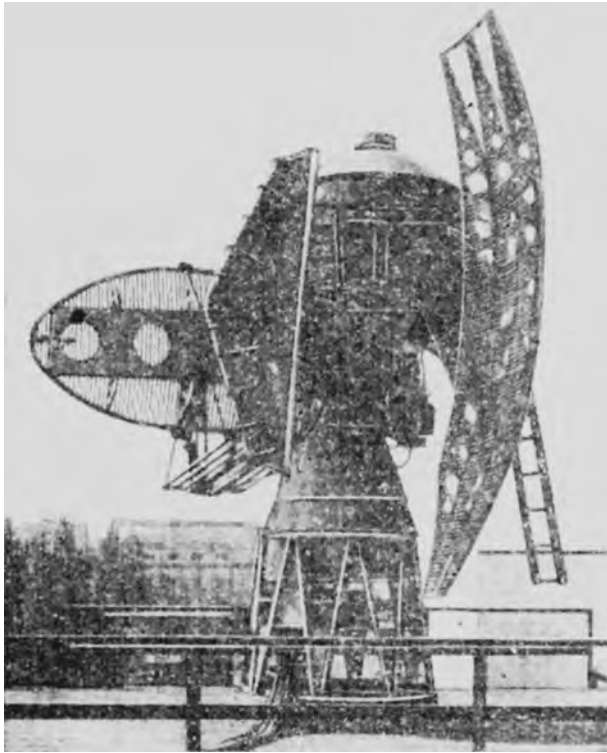


Рис. 16



Рис. 16, а

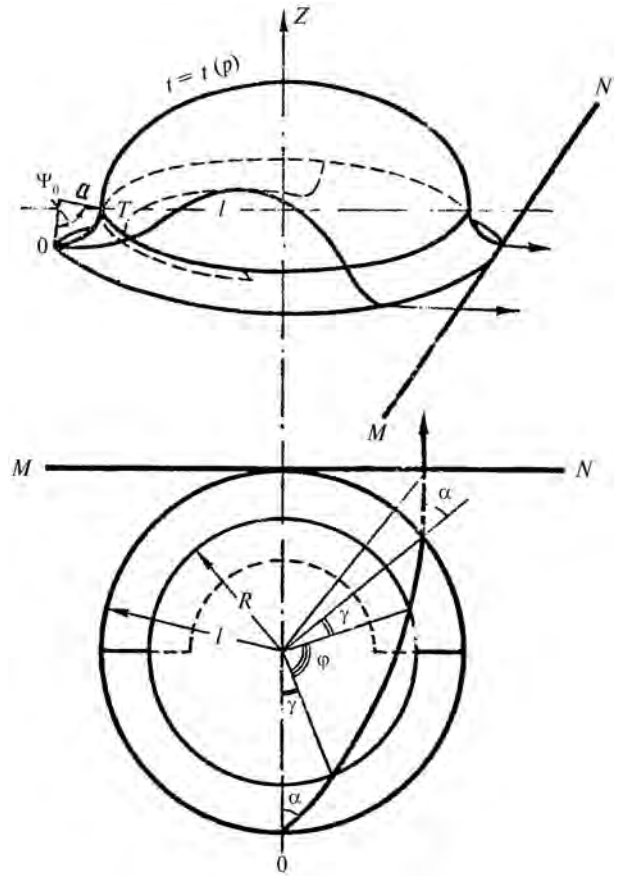


Рис. 17

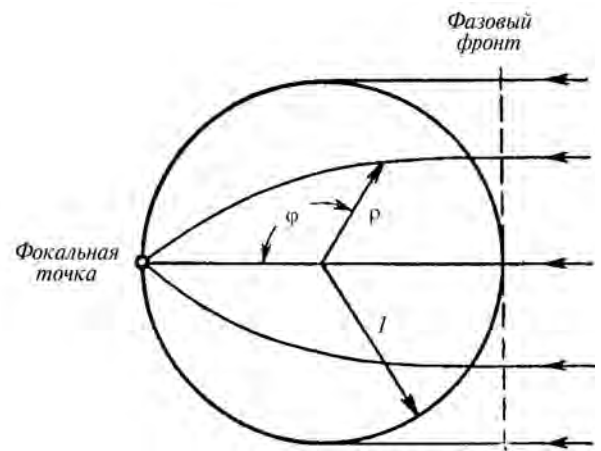


Рис. 18

лей на входе волноводного коллиматора, который в свою очередь должен быть спроектирован так, чтобы перемещение облучателя не требовало слишком замысловатых механизмов и сложных траекторий движения. Наиболее просто такие задачи решаются, если может быть реализовано круговое движение облучателя по дуге минимального радиуса. На рис. 15, а показана система из двух плоских металлических листов. Здесь  $I$  — первичный облучатель, который создает

цилиндрический фронт волны. Энергия выходит из промежутка ДД и облучает зеркальную систему с периодическим сканированием в одной плоскости. Очевидно, что такое сканирование в системе (рис. 15) возможно только за счет возвратно-поступательного периодического движения облучателя вдоль линии СВС (как в паровозе). Покажем, как из плоского волноводного коллиматора с линейным входом и линейным выходом можно получить коллиматор с кольце-

вым входом. Процесс преобразования прямой СВЧ в окружность показан на рис. 15, б, а итог этого процесса показан на рис. 15, в со стороны раскрыва ДД. Здесь 1 — круговая траектория сканирования. На рис. 16 показана корабельная РЛС определения высоты и перехвата воздушной цели, в составе которой использован свернутый волноводный коллиматор.

Такой же коллиматор виден в составе антенны зенитно-пушечного комплекса на рис. 16, а, где он обеспечивает сканирование луча в вертикальной плоскости при одновременном вращении всей антенны в азимутальной плоскости.

В некоторых сканирующих антеннах могут найти применение волноводные коллиматоры, поверхность которых имеют неплоскую форму как две солдатские каски, вложенные одна в другую с некоторым зазором (рис. 17). Лучи в таком коллиматоре собираются в параллельный пучок за счет такого изгибающих канализирующих поверхностей, при котором обеспечивается равенство длин всех лучей от облучателя до некоторой прямой линии на противоположной стороне коллиматора. Такая структура лучей характерна для диэлектрической линзы Лüneберга, сечение которой с соответствующим ходом лучей показана на рис. 18. Выпуклый волноводный коллиматор, аналог линзы Лüneберга, показанной на рис. 17, обладает осевой симметрией, и поэтому параллельный пучок лучей формируется для любого расположения облучателя на периметре системы, которая вследствие этого может использоваться для кругового сканирования в одной плоскости. На рис. 19 показан в разобранном

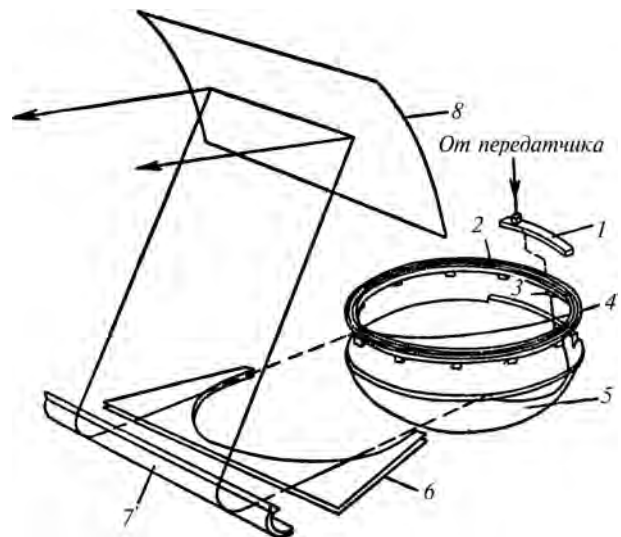


Рис. 19

виде аналог линзы Лüneберга, используемый для сканирования в широком секторе углов. Здесь 1 — перевернутый коллиматор, 2 — первичный облучатель, 3 — плоский промежуточный рупор, 4 — переизлучатель, 5 — параболический рефлектор.

Приведенный обзор антенн на базе параболических цилиндров и волноводных коллиматоров далеко не отражает всего многообразия таких антенн, но дает возможность оценить их применимость для решения тех или иных задач, возникающих перед разработчиком антенных устройств.

## ПРОСТЫЕ МОНОЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ

Зеркала, используемые в антенных системах СВЧ, имеют две основные геометрические характеристики: кривизну поверхности и форму апертуры, зеркала могут быть поляризованными, неполяризованными и поляризующими. В последнем случае зеркало является преобразователем поляризации поля. В качестве простых зеркал мы будем рассматривать зеркала, поверхность которых образована только одной кривой в отличие от зеркал двойной кривизны и не имеющие на своей поверхности каких-либо преломляющих сред. Практически это означает, что простыми можно считать зеркала, образованные только кривыми второго порядка и плоскость. Плоское зеркало широко применяется как отдельно, так

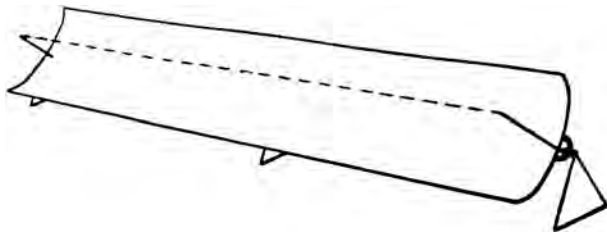


Рис. 20

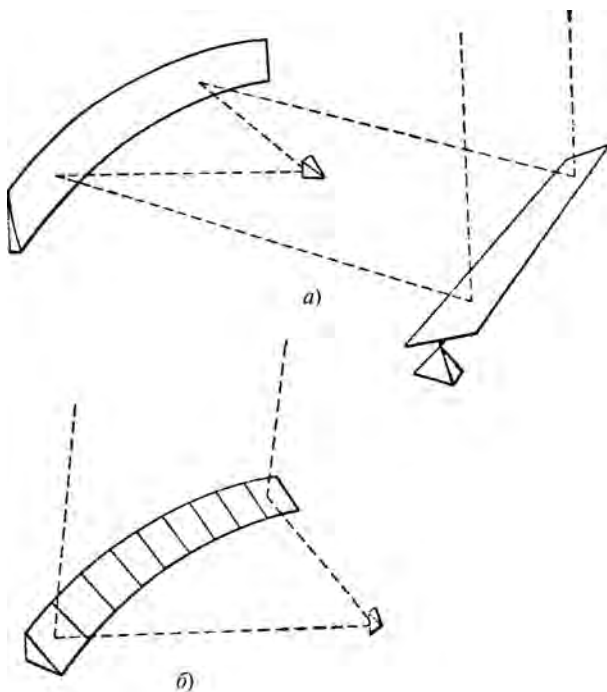


Рис. 21

и в комбинации с другими зеркалами. Небольшие зеркала используются в облучателях, а большие — в качестве пассивных отражателей в радиорелейных линиях и в радиоастрономии. Отражающие поверхности, образованные кривыми второго порядка, обладают идеальным анастигматизмом, т. е. фокусируют в одной и той же точке лучи плоских взаимно ортогональных пучков: сагиттального и меридиопального.

Даже простейшие, на первый взгляд, зеркала 2-го порядка находят весьма широкое применение, например в радиоастрономии. В 1937 г. был построен первый радиотелескоп, специально предназначенный для радиоастрономических наблюдений. Это был параболоид вращения, который в какой-то мере являлся аналогом оптического зеркального телескопа и был "потомком" первых антенн, использованных Герцем в его ранних экспериментах с радиоволнами.

На рис. 20 показан телескоп с отражателем в форме параболического цилиндра, который может поворачиваться только по углу места. Другая схема радиотелескопа показана на рис. 21; здесь плоский поворотный рефлектор отражает падающую на него энергию на неподвижный параболический рефлектор. Энергия собирается в фокусе этого рефлектора, где установлен облучатель рупорного или любого другого типа. Такая антенна может использоваться в двух видах. Они показаны на рис. 22, *a*, *б*. На рис. 22, *a* поверхность покрыта металлическими листами. На рис. 22, *б* поверхность земли находится вне путей лучей. Неподвижная часть параболоида вращения *B* имеет сравнительно большое отношение  $F/D$ , что уменьшает кому и дает возможность сопровождать источник излучения по небосводу, если передвигать еще и облучатель по специальному пути. У Пулковского радиотелескопа нет подвижного плоского зеркала. Основной рефлектор состоит из большого числа отражающих панелей, каждая из которых может индивидуально устанавливаться так, чтобы составить часть поверхности большого параболоида.

ДН перемещается по небосводу, если переставлять индивидуально плоские панели, как показано на рис. 23. Чтобы изменить направление максимума ДН от горизонта до зенита, необходимо изменить наклон панелей от вертикального до  $45^\circ$ ; а расстановку в горизонтальной плоскости изменить от параболической формы (*a*) до дуги окружности (*б*). Преимущество Пулковской

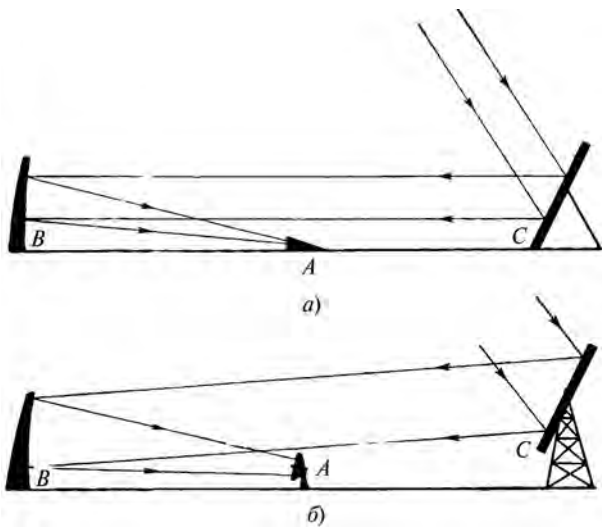


Рис. 22

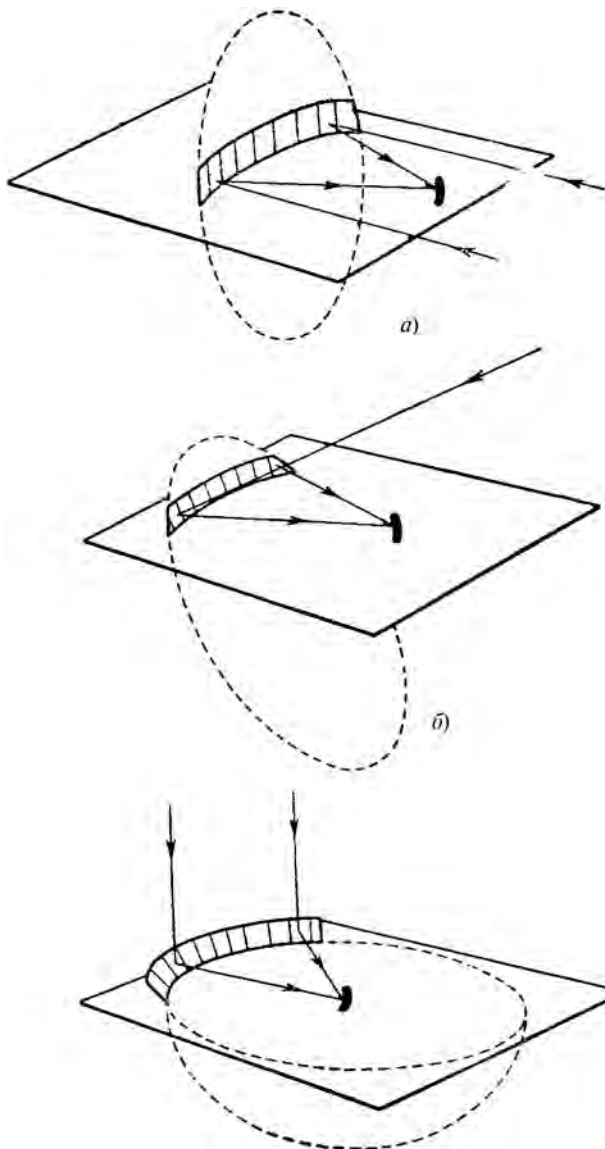


Рис. 23

антенны в том, что как фокус, так и отражающие щиты расположены в горизонтальной плоскости и установлены непосредственно на земле.

На рис. 24 показан параболоид вращения, составленный из плоских панелей. Облучатель расположен на высокой мачте, а плоские панели установлены на земле. Панели необходимо расположить по зонам с определенным шагом между каждой зоной. Величина шага выбирается так, чтобы изменить длину пути луча на целое число длин волн по отношению к путям лучей, отраженных от других зон.

Радиотелескоп может иметь форму сферического рефлектора. В отличие от параболоида у такого рефлектора нет главной оптической оси, и он может принимать радиоволны с разных направлений, оставаясь неподвижным (рис. 25, а). Концентричная с основным рефлектором сфера, расположенная на расстоянии половины радиуса от общего центра, является квазифокальной поверхностью, на которой собираются лучи, отраженные основным рефлектором. Если передвигать облучатель по квазифокальной поверхности, то можно принимать энергию, приходящую с разных направлений. На этой поверхности можно установить сразу несколько неподвижных облучателей, каждый со своим приемником. Радиальный линейный облучатель использует существенно большую часть основного рефлектора, как показано на рис. 25, б.

К категории простых зеркальных антенн можно достаточно условно отнести осесимметричные параболоиды, параболоиды с вынесенным фокусом и рупорно-параболические антенны. Схема параболоида с вынесенным фокусом пред-

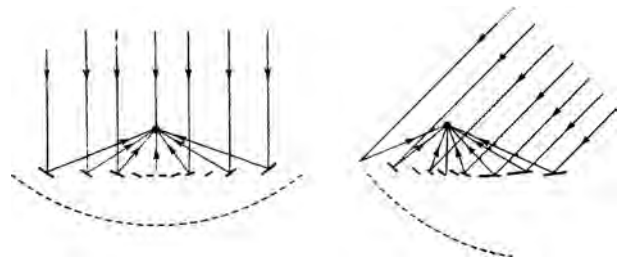


Рис. 24

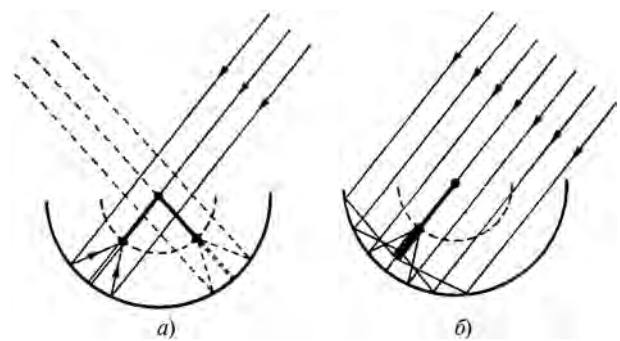


Рис. 25

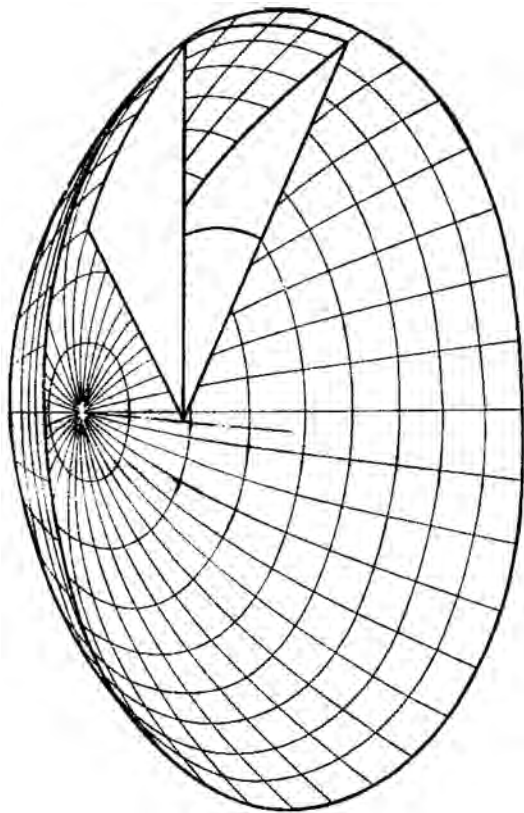


Рис. 26

ставляет собой неосесимметричную вырезку из параболоида вращения и соответствующим образом ориентированного облучателя. Конфигурация зеркала такова, что облучатель оказывается вне области действия отраженного от зеркала поля. Это практически полностью устраняет влияние зеркала на входное сопротивление облучателя и его согласование с питающей линией. При небольших (порядка 2—6 метров) размерах антенна с вынесенным фокусом обладает существенными конструктивными преимуществами перед осесимметричным зеркалом при практически одинаковых электрических характеристиках. Поэтому антенны с вынесенным фокусом в количественном отношении далеко опережают все другие зеркальные антенны.

Достаточно удачным вариантом антенн с вынесенным фокусом являются рупорно-параболические антенны (рис. 26), которые представляют собой неосесимметричную вырезку трапециевидальной формы из параболоида вращения, облучаемого рупором. Основная особенность этой антенны заключается в том, что рупор и отражающее зеркало представляют собой единую конструкцию. Это во многом устраняет один из основных недостатков параболических антенн, заключающийся в том, что часть энергии облучателя в режиме передачи не попадает на поверхность зеркала, что уменьшает эффективность антенн и приводит к росту уровня бокового излу-

чения. Кроме того, в РПА отраженное от зеркала поле не попадает в питающую линию и не рассеивается на облучателе и элементах его крепления. Широкое применение находят РПА в качестве радиорелейных антенн (рис. 26, а) и даже наземных антенн спутниковой связи (рис. 26, б).

Получив представление об использовании параболических антенн, рассмотрим далее процессы, происходящие в параболических антеннах при сканировании для того, чтобы оценить перспективы их использования в качестве сканирующих антенн. Первоначально воспользуемся лучевым методом для оценки искажений, возникающих при сканировании. С этой целью



Рис. 26, а



Рис. 26, б



были проведены расчеты хода лучей при падении на раскрыв антенны наклонного волнового фронта. На рис. 27 показана параболическая антенна в режиме приема, на которую падает плоский фронт под углом  $\alpha_r$  к вертикали. Направляющие косинусы единичной нормали  $\bar{P}_r$  к фронту  $S$  падающей волны  $P_{rx} = -\cos\alpha_r$ ;  $P_{ry} = -\sin\alpha_r$ ;  $P_{rz} = 0$ .

Для исследования хода лучей необходимо выбрать систему точек поверхности зеркала, в которых отражаются лучи.

Будем предполагать, что эти точки находятся на окружностях радиусом  $R = aD$ , где  $0 \leq a \leq 0,5$ ,  $D$  — диаметр зеркала. На рис. 28 нумерация этих окружностей начинается от вершины зеркала. Тогда с учетом уравнения зеркала координаты этих точек:

$$x_m = \frac{y_m^2 + z_m^2}{4f}; \quad y_m = R \cos\varphi; \quad z_m = R \sin\varphi.$$

$\varphi$  — угол, отсчитываемый от оси  $OY$ .

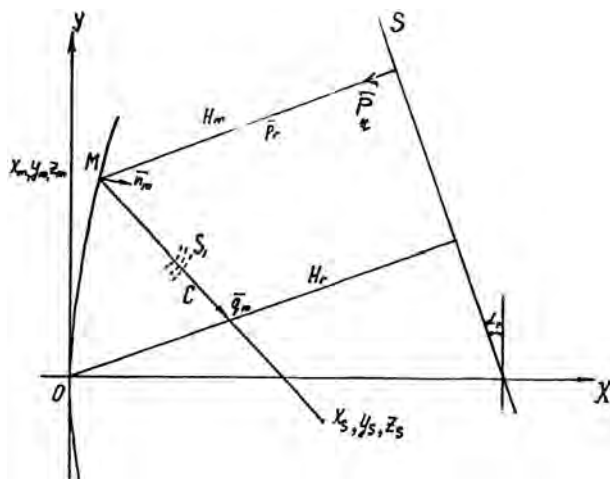


Рис. 27

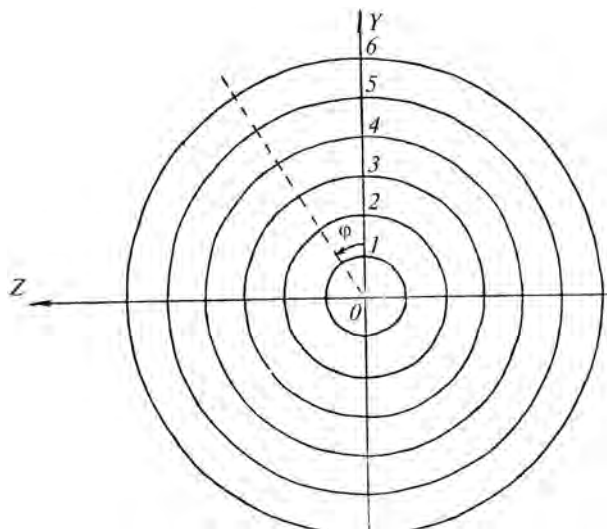


Рис. 28

Направляющие косинусы единичной нормали  $\bar{n}_m$  к поверхности зеркала в произвольной точке  $M$

$$n_{mx} = \frac{1}{n}; \quad n_{my} = -\frac{1}{n} \frac{2y_m}{4f}; \quad n_{mz} = -\frac{1}{n} \frac{2z_m}{4f}$$

$$n = \left[ \left( \frac{2y_m}{4f} \right)^2 + \left( \frac{2z_m}{4f} \right)^2 + 1 \right]^{1/2}.$$

Единичная нормаль  $\bar{q}_m$  к фронту волны  $S_1$ , отраженной от поверхности зеркала, связана с  $\bar{P}_r$  и  $\bar{n}_m$  соотношением:

$$\bar{q}_m = \bar{P}_r - (\bar{n}_m \cdot \bar{P}_r) \bar{n}_m$$

или для соответствующих направляющих косинусов

$$q_{mx} = P_{rx} - 2(n_{mx}P_{rx} + n_{my}P_{ry} + n_{mz}P_{rz})n_{mx},$$

$$q_{my} = P_{ry} - 2(n_{mx}P_{rx} + n_{my}P_{ry} + n_{mz}P_{rz})n_{my},$$

$$q_{mz} = P_{rz} - 2(n_{mx}P_{rx} + n_{my}P_{ry} + n_{mz}P_{rz})n_{mz}.$$

Положение волнового фронта в области фокуса определяется константой  $W = C + H_m$ , где  $H_m$  — расстояние от фронта падающей волны до точки  $M$  поверхности зеркала.

$$H_m = x_m P_{rx} + y_m P_{ry} + z_m P_{rz} + H_r,$$

$H_r$  — расстояние от начала координат до фронта падающей волны.

Координаты точек отраженного фронта в области фокуса:

$$x_s = x_m - q_{mx}t_s; \quad y_s = y_m - q_{my}t_s; \quad z_s = z_m - q_{mz}t_s;$$

$$t_s = (x_m - U_s)/q_{mx},$$

где  $x = U_s$  — уравнение некоторой вспомогательной плоскости.

В соответствии с приведенными формулами были проведены расчеты хода лучей и волновых фронтов для  $\alpha_r = 20^\circ$ .

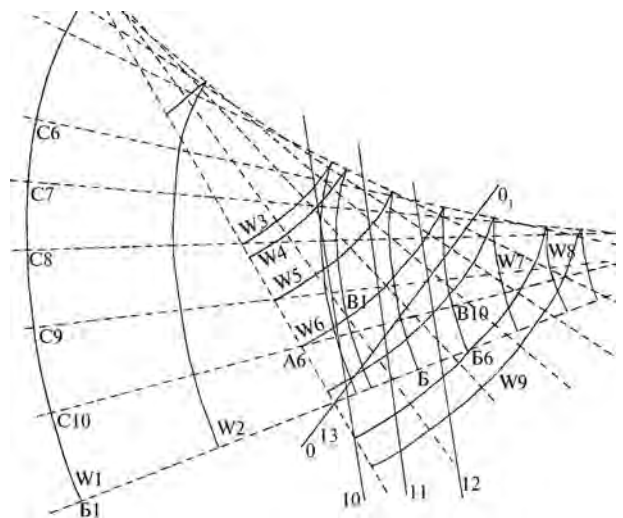


Рис. 29

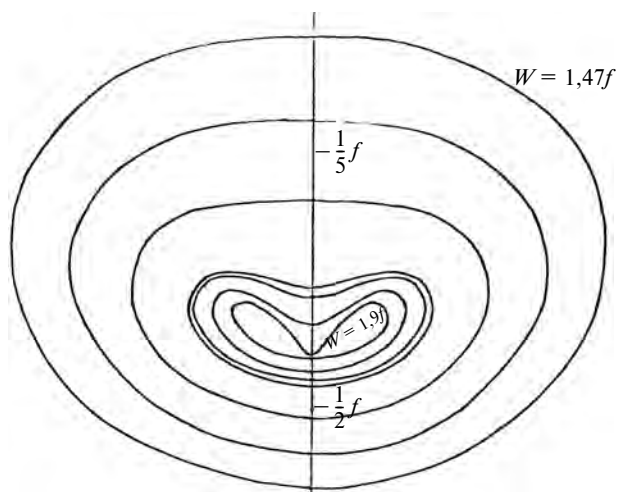


Рис. 30

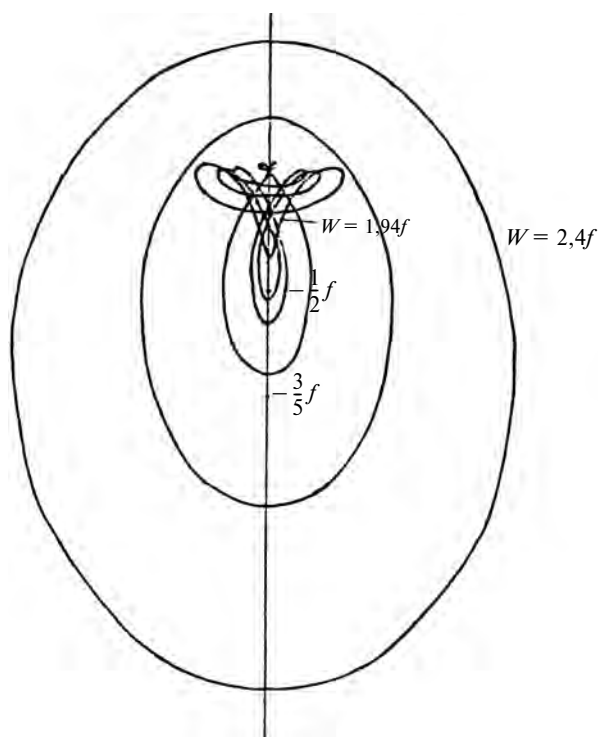


Рис. 31

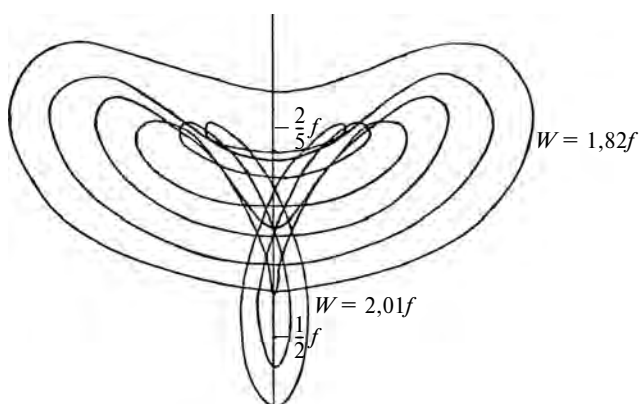


Рис. 32

На рис. 29 показан ход лучей в меридиональной плоскости и сечения волновых фронтов (кривые 1—9) при разных значениях расстояний:  $W = 1,58f, 1,69f, 1,82f, 1,86f, 1,98f, 2,01f, \dots$ , а также следы плоскостей (10—13).

Для анализа волновых фронтов в области фокуса рассмотрим процесс отражения лучей от отдельных кольцевых сечений поверхности зеркала. На рис. 30—32 показана проекция геометрического места точек одинаковой фазы на лучах, отраженных от одного и того же кольцевого сечения зеркала максимального радиуса ( $R = D/2$ ), на различных расстояниях  $W$  от падающего плоского фронта. При этом на рис. 30  $1,47f \leq W \leq 1,9f$ , а на рис. 31  $1,94f \leq W \leq 2,4f$ . На рис. 32 представлены кривые для  $R = D/2$  при  $1,82f \leq W \leq 2,01f$  в увеличенном масштабе.

Сечение  $R = D/2$  соответствует краю раскрытия параболического зеркала. Рис. 30—32 позволяют судить об искажениях структуры лучей и волновых фронтов при сканировании.

Были проведены расчеты координат точек пересечения лучей с плоскостями, показанными на рис. 29, сплошными линиями (10—13). Расчеты проводились в пределах области наибольшего сужения пучка лучей. На рис. 33—37 сплошными линиями показаны геометрические места проекций на пл.  $YOZ$  точек пересечения лучей с плоскостями

$$7,4 \cdot 10^{-2}fx + 10^2fy + P = 0,$$

где  $p$  принимает значения  $-2,71f, -2,85f, -2,99f$ . На каждом рисунке отдельная замкнутая линия соответствует конкретному кольцевому сечению радиуса  $R$  на зеркале. Огибающая этих кривых, показанная пунктиром, представляет собой проекцию сечения пучка лучей в целом. Номера сплошных кривых соответствует номерам окружностей на рис. 28. Пунктирная линия ограничивает область, в пределах которой все лучи пучка пересекают данную плоскость. Уменьшая количество сплошных линий, начиная с кривой с наибольшим номером, которая соответствует самому внешнему кольцевому сечению на зеркале, можно получить проекцию огибающей сечения для меньшего диаметра зеркала при одном и том же фокусном расстоянии, т. е. для большего  $f/D$ . На рис. 36 дополнительно показана проекция сечения пучка лучей плоскостью

$$0,1fx + 0,03fy - 4,85f = 0.$$

Проекция этой плоскости на рис. 29 представляет собой прямую  $0O_1$ . Эта плоскость интересна тем, что проходит через наибольшее сужение пучка лучей в пл.  $XOY$ . Как выглядит это сечение в пл.  $YOZ$ , видно из рис. 36.

Все рисунки имеют привязку к координатным осям, и расстояния на них выражены в долях фокусного расстояния, что позволяет использо-

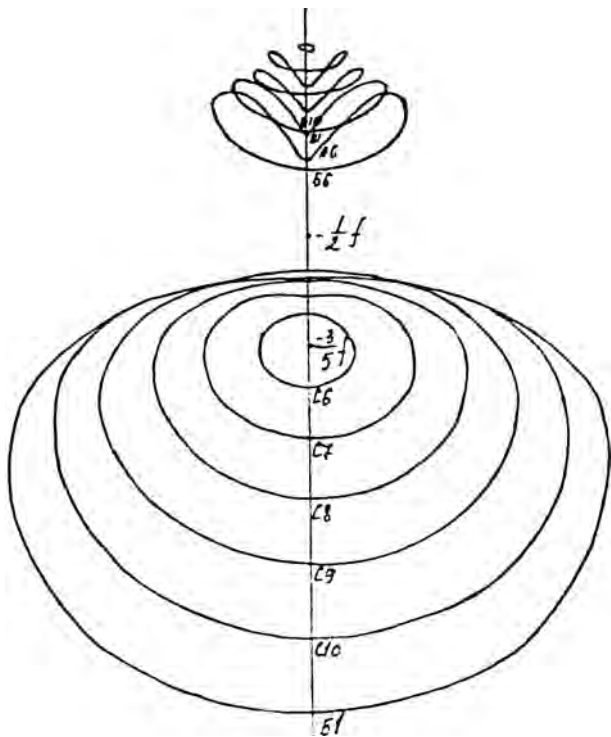


Рис. 33

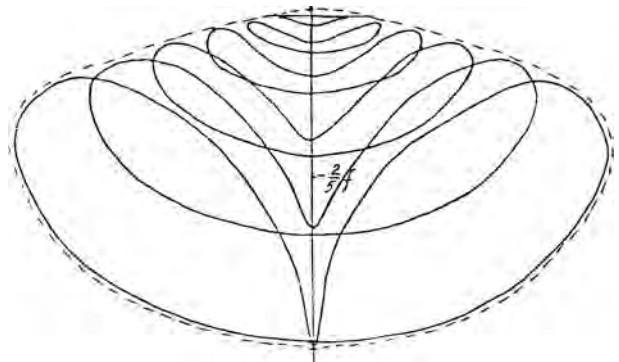


Рис. 35

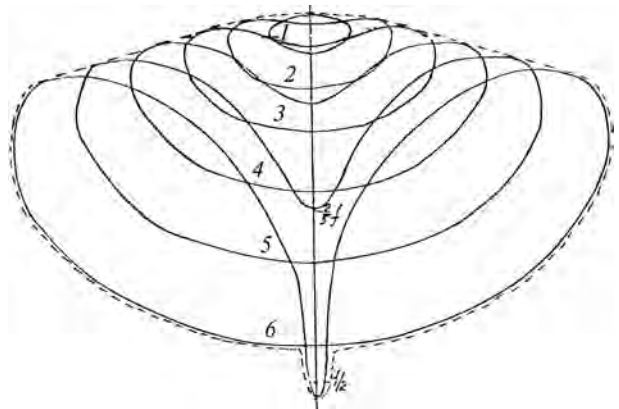


Рис. 36

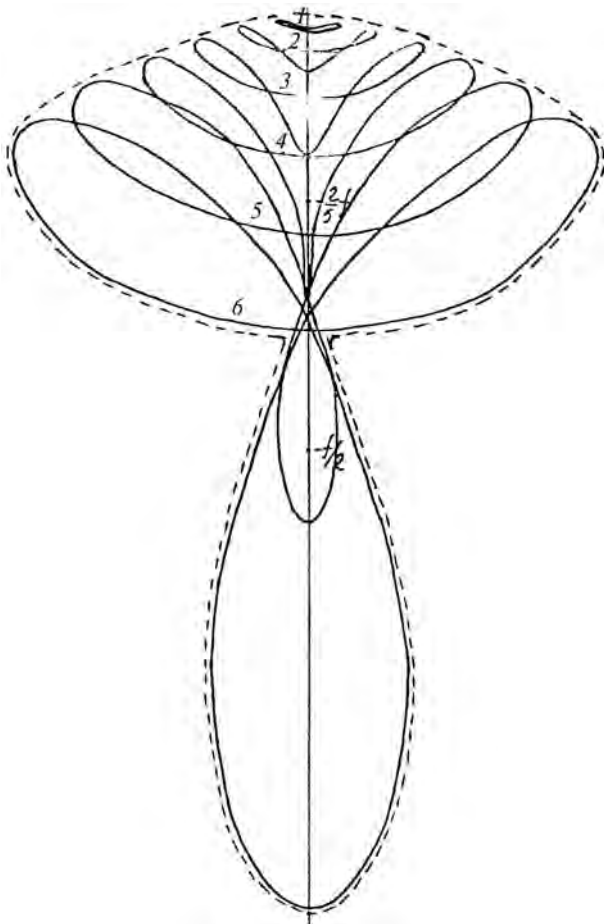


Рис. 34

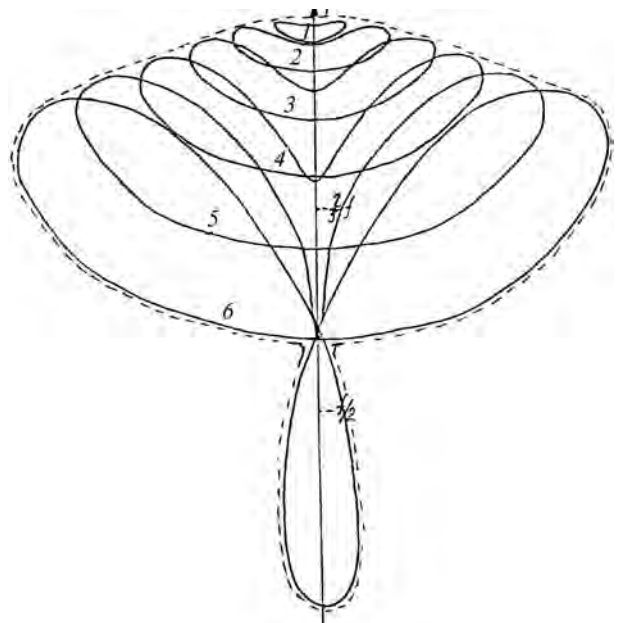


Рис. 37

вать данные графики для параболической антенны с любым отношением  $f/D$ .

Из рис. 33 кстати видно, что в меридиональной плоскости размер поперечного сечения пучка лучей вдвое меньше, чем в саггитальной плоскости.

Расчет диаграммы направленности параболической антенны в процессе сканирования обычно производится апертурным методом и реже — токовым методом. Рассмотрим сначала расчет апертурным методом.

Диаграмма направленности антенны в приближении Кирхгофа, т. е. в области основного лепестка и ближайших боковых, в простейшем случае определяется выражением

$$f(\theta) = \int_{R_1}^{R_2} A(y) e^{i(ky \sin \theta) - i\psi(y)} dy,$$

где  $\theta$  — направление на точку наблюдения относительно оси антенны, нормальной к раскрытию,  $R_2 - R_1 = D$  — раскрытие антенны,  $\psi(y)$  — фазовое распределение по раскрытию,  $A(y)$  — амплитудное распределение по раскрытию. Решение интеграла может производиться численными методами, причем интеграл заменяется суммой

$$f(\theta) = \Delta y \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n A(y_i) \cos \xi_i \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^n A(y_i) \sin \xi_i \right]^2} \times \frac{i \arctg \left[ \frac{\sum_{i=1}^n A(y_i) \sin \xi_i}{\sum_{i=1}^n A(y_i) \cos \xi_i} \right]}{\sum_{i=1}^n A(y_i) \cos \xi_i},$$

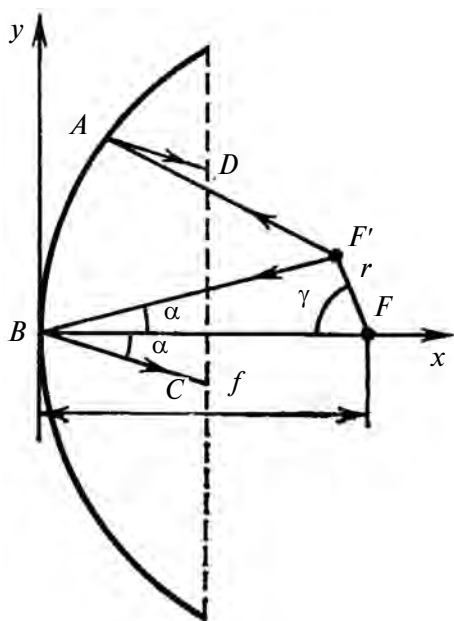


Рис. 38

где  $u = \frac{2\pi D}{\lambda 2} \sin \theta$ ,  $\xi = uy_i - \psi(y_i)$ , причем отдельные значения поля в раскрытии ( $A(y_i)$ ) и отдельные значения фазы ( $\psi(y_i)$ ) соответствуют разбиению раскрытия антенны на отдельные участки.

Для расчета фазового распределения  $\psi(y)$  можно воспользоваться рис. 38, на котором показан ход лучей в параболической антенне в плоскости сканирования:

$$\psi(y) = \frac{2\pi}{\lambda} (F'AD - F'BC).$$

Небольшим углам отклонения диаграммы направленности (не более  $10^\circ$ ) соответствует следующее выражение для фазового распределения:

$$\psi(y) = 2\frac{\pi}{\lambda} f \frac{\frac{r}{f} \left\{ \frac{D}{2f} y \sin \gamma + \left[ 1 - \left( \frac{Dy}{4f} \right)^2 \right] \cos \gamma \right\} - \left( \frac{r}{2f} \right)^2}{1 + \left( \frac{Dy}{4f} \right)^2},$$

где  $\gamma$  — угол, определяющий направление выноса облучателя из фокуса,  $r/f$  — величина выноса облучателя  $r$ , нормированная к фокусному расстоянию  $f$ ,  $D$  — диаметр раскрытия. Поле в раскрытии антенны при сканировании можно считать в первом приближении таким же, как и при расположении источника в фокусе:

$$A(y) = A(\varphi) \frac{1 + \cos \varphi}{2},$$

где  $A(\varphi)$  — диаграмма направленности облучателя.

На рис. 39 представлена зависимость ширины диаграммы направленности  $\theta^\circ$  от величины угла отклонения диаграммы направленности  $\theta_m^\circ$

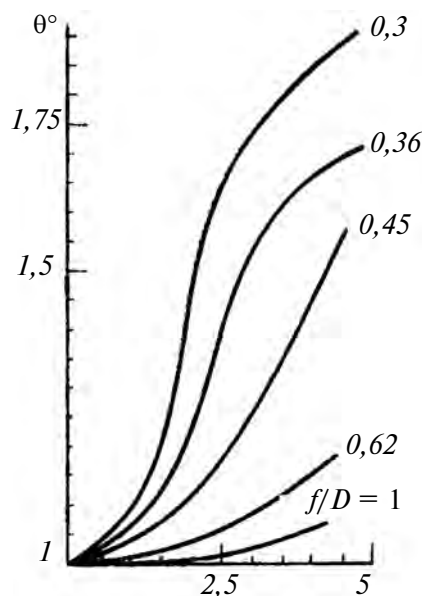


Рис. 39

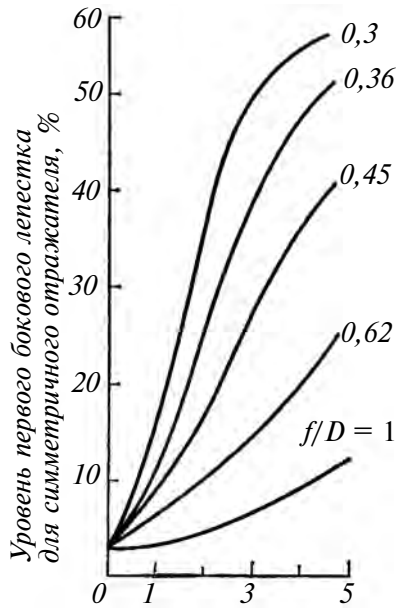


Рис. 40

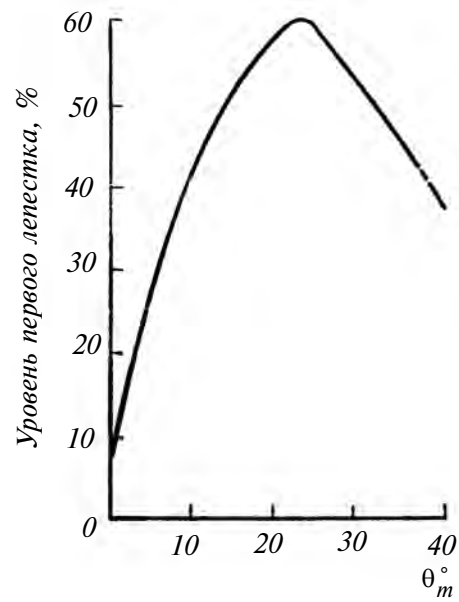


Рис. 42

относительно оси антенны для случая, когда антенна формирует градусный луч ( $D/\lambda = 100$ ). Видно, что ширина диаграммы возрастает особенно резко в антеннах с малым отношением  $f/D$  ( $f/D \leq 0,3$ ); такие антенны непригодны для сканирования в секторе углов большем, чем удвоенная ширина диаграммы направленности. Графики 39 получены для поля на краю раскрыва, равного 10 % от поля в центре раскрыва.

На рис. 40 показана зависимость уровня первого бокового лепестка от угла сканирования для антенны с тем же отношением  $D/\lambda = 100$ . Как и на предыдущем рисунке, здесь уровень лепестков зависит от кривизны зеркала, т. е. от отношения  $f/D$ . Следует отметить, что рис. 39 и 40

характеризуют диаграмму направленности только в плоскости сканирования, т. е. в меридиональной плоскости.

Были получены расчетные диаграммы для антенн в виде параболического цилиндра, имеющего  $f/D = 0,435$ , где  $D$  — размер раскрыва цилиндра в плоскости параболы. На рис. 41 и 42 соответственно приведена зависимость ширины диаграммы и уровня первого лепестка по напряженности в функции угла сканирования  $\theta_m$  для отношения  $D/\lambda = 30$ .

Обобщенный график зависимости КНД от угла отклонения максимума диаграммы направленности в параболической антенне представлен на рис. 43. Здесь по вертикали отложен относи-

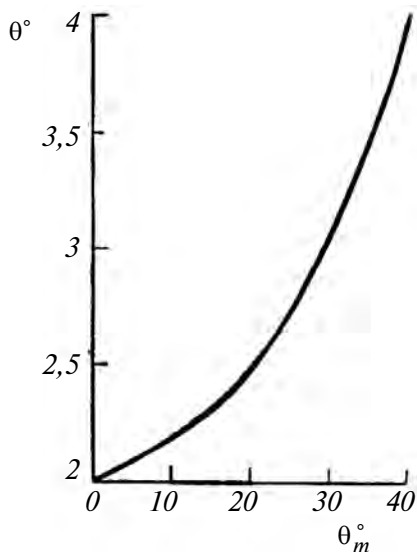


Рис. 41

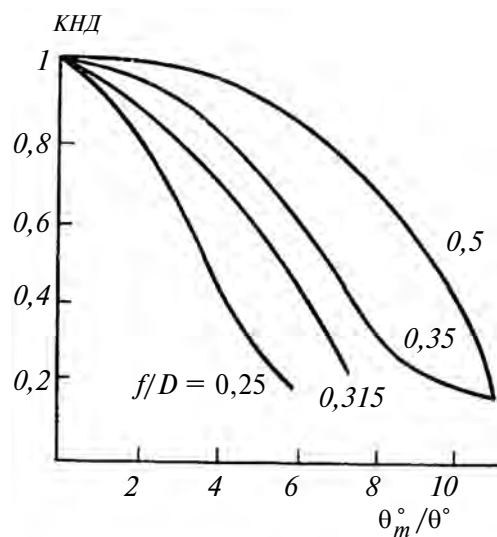


Рис. 43

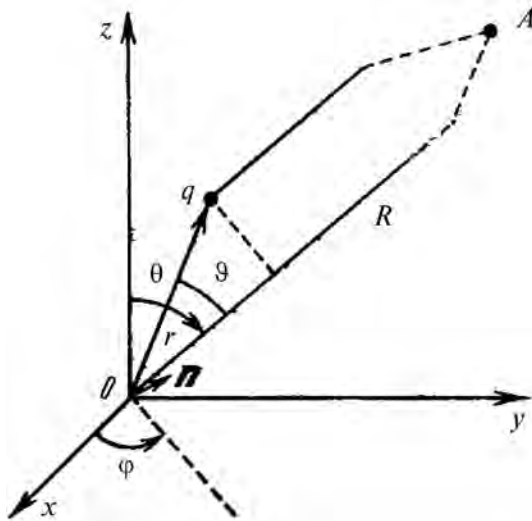


Рис. 44

тельный КНД, а по горизонтали отношение угла сканирования  $\theta_m^\circ$  к ширине диаграммы направленности  $\theta^\circ$ . Из рисунка видно, что в процессе сканирования происходит уменьшение КНД антенны, причем КНД падает тем сильнее, чем короткофокуснее антенна, т. е. чем меньше отношение  $f/D$ .

Рассмотрим теперь метод расчета параболической антенны (при сканировании) по токам на поверхности зеркала. Для анализа главного лепестка диаграммы направленности и ближних боковых лепестков можно пренебречь токами, затекающими на теневую сторону отражателя, а также считать, что вся энергия облучателя попадает на зеркало.

Как известно, поля  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  в дальней зоне могут быть найдены по распределению электрических и магнитных токов на поверхности зеркала следующим образом:

$$\mathbf{E} = \frac{k}{4\pi i} \frac{\exp(-ikR)}{R} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} (N_\theta \mathbf{i}_\theta + N_\varphi \mathbf{i}_\varphi), \quad (1a)$$

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{\varepsilon_a}{\mu_a}} [\mathbf{i}_R \mathbf{E}].$$

Здесь  $R$  — расстояние до точки наблюдения,  $N_\theta$  и  $N_\varphi$  — составляющие поля ( $\mathbf{N} = N_\theta \mathbf{i}_\theta + N_\varphi \mathbf{i}_\varphi$ ),  $\mathbf{i}_\theta$ ,  $\mathbf{i}_\varphi$ ,  $\mathbf{i}_R$  — единичные орты сферической системы координат.

Векторная функция  $\mathbf{N}$  определяется выражением

$$\mathbf{N} = \int_S [\mathbf{n} \mathbf{H}_S] \exp(ikr \cos \theta) dS, \quad (16)$$

где  $\mathbf{H}_S$  — вектор магнитного поля облучателя у поверхности зеркала  $S$ ,  $\mathbf{n}$  — единичная нормаль к этой поверхности.

На рис. 44 показана система координат с началом в точке  $O$ . Здесь  $\mathbf{R}$  — радиус-вектор точки, в которой рассчитывается поле,  $q$  — точка интегрирования на зеркале,  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор этой точки.

Векторная функция  $\mathbf{N}$  определяет напряженность поля в зависимости от направления в пространстве; модуль этой функции представляет собой амплитудную, а аргумент — фазовую диаграмму направленности антенны.

Поскольку диаграмма направленности реального облучателя может иметь достаточно сложный вид, прибегают к аппроксимации. Возможна следующая форма аппроксимации диаграммы рупорного облучателя:

амплитудная диаграмма

$$|G(\alpha, \beta)| = \exp[-n(\alpha - \pi/2)^2 - m(\beta - \beta_0)^2];$$

фазовая диаграмма

$$\arg G(\alpha, \beta) = L - \frac{(\alpha - \pi/2)^2}{a^2} - \frac{(\beta - \beta_0)^2}{b^2},$$

где  $n$ ,  $m$ ,  $L$ ,  $a$ ,  $b$  — коэффициенты аппроксимации,  $\beta_0$  — направление максимума диаграммы направленности облучателя, вынесенного из фокуса параболы  $O$  в произвольную точку  $C$  (рис. 45). Что касается поляризационной характеристики облучателя, то в случае линейной поляризации поля рупора можно в ряде случаев полагать, что он имеет такую же поляризационную характеристику, как и два ортогональных диполя (электрический и магнитный), расположенные в раскрытие рупора.

Тогда векторные функции облучателя будут иметь вид

$$F_{\text{обл}} = \mathbf{k}' |G(\alpha, \beta)| \exp[i \arg G(\alpha, \beta)],$$

$$F_{\text{обл}\mu} = \mathbf{i}' |G(\alpha, \beta)| \exp[i \arg G(\alpha, \beta)]$$

для электрической и магнитной составляющих поля соответственно. Здесь  $\mathbf{i}'$ ,  $\mathbf{k}'$  — орты осей  $x'$  и  $z'$

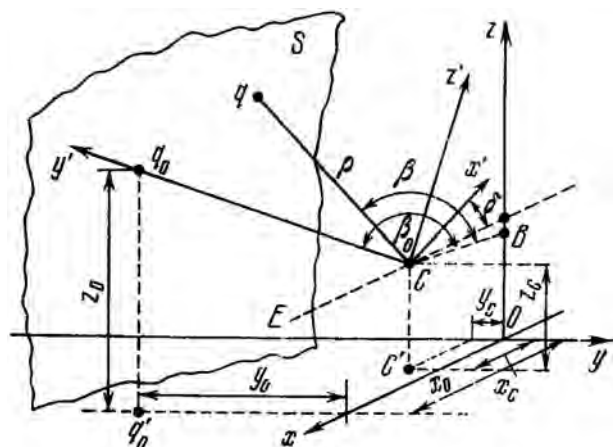


Рис. 45

(рис. 45), совпадающие с векторами магнитного и электрического полей в раскрыве облучателя.

Система координат  $x', y', z'$  на рис. 45 связана с облучателем, вынесенным в точку  $C$ , положение которой характеризуется координатами  $x_C, y_C$  и  $z_C$ . Ось  $y'$  направлена в точку  $q_0$  с координатами  $x_0, z_0, y_0$ . Эта точка расположена на поверхности зеркала  $S$ . Проекция точки  $q_0$  на плоскость  $(xy)$  есть  $q'_0$ , проекция точки  $C-C'$ . Горизонтальная плоскость, в которой лежит точка  $C$ , пересекает ось  $z$  в точке  $B$ . Направление максимума диаграммы направленности будем характеризовать углом  $\beta_0$ , который отсчитывается от линии  $BC$ . Наклон оси  $Cx'$  к горизонту задается углом  $\delta$ , который отсчитывается от линии  $DE$ , параллельной оси  $Ox$ .

Орты  $\mathbf{i}'$  и  $\mathbf{k}'$  осей  $Cx'$  и  $Cz'$  связаны с ортами системы координат  $x, y, z$  равенствами

$$\mathbf{i}' = -\mathbf{i} \cos \delta - \mathbf{j} \sin \delta,$$

$$\mathbf{k}' = -\mathbf{i} \sin \delta \sin \beta_0 + \mathbf{j} \cos \delta \sin \beta_0 - \mathbf{k} \cos \beta_0.$$

Теперь поле облучателя на поверхности зеркала можно записать в виде

$$\mathbf{E}_S = \frac{k}{4\pi i} \left\{ \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} [\mathbf{i}_\rho [\mathbf{F}_{\text{обл}} \mathbf{i}_\rho]] + [\mathbf{i}_\rho \mathbf{F}_{\text{обл}}] \right\} \left[ \frac{1}{\rho} \exp(-ik\rho) \right],$$

$$\mathbf{H}_S = \sqrt{\frac{\varepsilon_a}{\mu_a}} [\mathbf{i}_\rho \mathbf{E}_S],$$

где  $\mathbf{F}_{\text{обл}}$  — векторная функция облучателя,  $\mathbf{i}_\rho$  — единичный вектор, направленный вдоль луча  $\rho$  (рис. 45) в произвольную точку  $q$  на отражателе,

$$\rho = \sqrt{(x_q - x_C)^2 + [F(x_q, z_q) - y_C]^2 + (z_q - z_C)^2}.$$

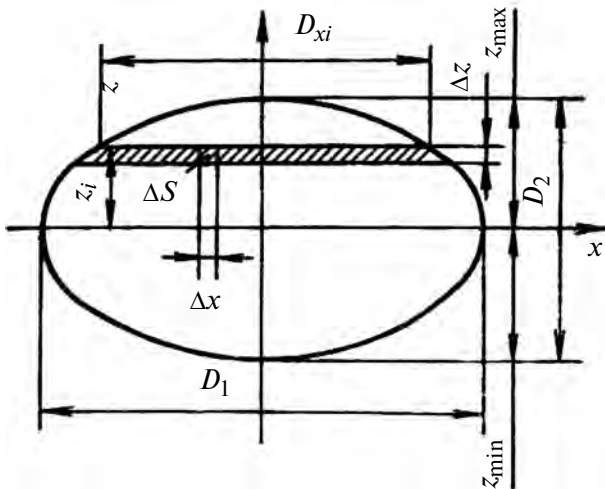


Рис. 46

В последнем выражении

$$F(x_q, z_q) = \frac{x_q^2 + z_q^2}{4f} - f$$

— уравнение параболоида с фокусным расстоянием  $f$ .

Для вычисления интеграла в выражении (16) в прямоугольной системе координат этот интеграл заменяется суммой. Например, для компоненты  $N_x$ , которую можно представить в виде

$$N_x = |N_x| \exp(i \arg N_x),$$

имеем

$$|N_x| = \Delta S \left\{ \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{p_i} Q(x_{ij}, z_i, F(x_{ij}, z_i)) \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{p_i} (x_{ij}, z_i, F(x_{ij}, z_i)) \right]^{1/2} \right\},$$

$$\arg N_x = \arctg \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{p_i} P(x_{ij}, z_i, F(x_{ij}, z_i))}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{p_i} Q(x_{ij}, z_i, F(x_{ij}, z_i))}, \quad (2)$$

где

$$Q(x_{ij}, z_i, F(x_{ij}, z_i)) = [\mathbf{H}_S(x_{ij}, z_i, F(x_{ij}, z_i))] \times \mathbf{n}(x_{ij}, z_i, F(x_{ij}, z_i))_x \cos\{kr(x_{ij}, z_i, F(x_{ij}, z_i))\} \times \cos\vartheta[\varphi, \theta, x_{ij}, z_j, F(x_{ij}, z_i)],$$

$$P(x_{ij}, z_i, F(x_{ij}, z_i)) = [\mathbf{H}_S(x_{ij}, z_i, F(x_{ij}, z_i))] \times \mathbf{n}(x_{ij}, z_i, F(x_{ij}, z_i))_x \sin\{kr(x_{ij}, z_i, F(x_{ij}, z_i))\} \times \cos\vartheta[\varphi, \theta, x_{ij}, z_j, F(x_{ij}, z_i)],$$

а угол  $\vartheta$  — это угол между направлениями векторов  $\mathbf{R}$  и  $\mathbf{r}$  (рис. 44):

$$\cos \vartheta = \cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cos(\varphi - \varphi').$$

Здесь  $\theta, \varphi$  — угловые координаты точки наблюдения  $A$ ,  $\theta', \varphi'$  — координаты точки интегрирования.

В первом из соотношений (2)  $\Delta S = \Delta x \Delta y \sqrt{1 + p^2 + q^2}$  — площадка, для которой ведется суммирование, причем  $p$  и  $q$  определяются из выражений

$$p = \frac{\partial F(x, z)}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial F(x, z)}{\partial z}.$$

Пределы сумм в (2) определяются в соответствии с рис. 46: количество слагаемых суммы по  $n$  определяется размером  $D_2$ , а по  $i$  — размером строк, которые на рисунке заштрихованы:

$$n = \frac{D_2}{\Delta z}, \quad p_i = \frac{D_{xi}}{\Delta x}.$$

Суммирование ведется по горизонтальным строкам (поясам), т. е. фиксируется (в пределах от  $z_{\max}$  до  $z_{\min}$  с интервалом  $\Delta z$ ) некоторое  $z_i$  и для него изменяются значения  $x_{ij}$  слева направо вдоль строки — от  $x_{i1}$  до  $x_{ip}$  — через  $\Delta x$ . Предельные значения  $x_{i1}$  и  $x_{ip}$  определяются из уравнения контура отражателя, заданного в виде  $x_{i1} = F(z_i)$ , а также размерами отражателя  $D_1$  и  $D_2$ . В случае симметричного эллиптического контура

$$x_{i1} = \frac{D_1 \sqrt{1 - 4z_i^2}}{2 D_2^2}.$$

После того как вычислены необходимые компоненты векторной функции  $N$  в прямоугольной системе координат, можно получить ее компоненты  $N_\theta$  и  $N_\varphi$  в сферической системе

$$N_\theta = (N_x \cos \varphi + N_y \sin \varphi) \cos \theta - N_z \sin \theta,$$

$$N_\varphi = -N_x \sin \varphi + N_y \cos \varphi,$$

а затем переходить непосредственно к вычислению электрического поля в дальней зоне

$$\mathbf{E}(\theta, \varphi) = \{\mathbf{i}_\theta | E_\theta(\theta, \varphi) | \exp[i \arg E_\theta(\theta, \varphi)] + \mathbf{i}_\varphi | E_\varphi(\theta, \varphi) | \exp[i \arg E_\varphi(\theta, \varphi)]\} \frac{k S_0}{4\pi I R} \exp(-ikR).$$

Здесь  $S_0$  характеризует абсолютную величину поля облучателя в максимуме его диаграммы,  $R$  — расстояние до точки наблюдения.

Применение токового метода расчета поля параболической антенны при сканировании должно улучшить точность расчета, особенно в области боковых лепестков.

Разновидностью параболической антенны является антенна в виде "вырезки" из параболоида вращения. В этой антенне используется только такая часть параболической поверхности, которая не экранируется облучателями, расположенными в фокусе и в его ближайшей окрестности. Эти антенны широко применяются в системах космической связи для сканирования в ограниченном секторе углов.

Расчет антенны в процессе сканирования предлагает, что производится исследование струк-

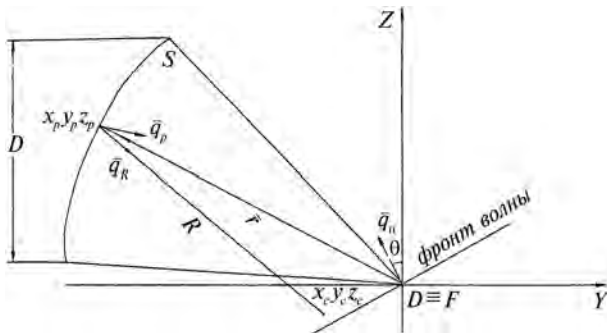


Рис. 47

туры поля в области фокуса в режиме приема, а в итоге и расчет ДН в режиме передачи. При этом максимальная эффективность может быть получена только в том случае, если правильно расположить и ориентировать облучатель или систему облучателей. В конечном случае потребуются еще и экспериментальная обработка антенны, а расчет может дать только предварительные результаты. Рассмотрим расчет поля в области фокуса, пользуясь рисунком 45. Поле, отраженное от зеркала, рассчитывается в некоторой точке вблизи фокуса по следующим формулам:

$$\dot{\mathbf{E}} = -j \frac{\omega \mu_0}{4\pi} \int_S \{ \dot{\mathbf{J}} - (\dot{\mathbf{J}} \cdot \bar{\mathbf{q}}_R) \bar{\mathbf{q}}_R \} \frac{e^{-jkR}}{R} dS, \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{H}} = \frac{jk}{4\pi} \int_S [\dot{\mathbf{J}} \cdot \bar{\mathbf{q}}_R] \frac{e^{-jkR}}{R} dS, \quad (4)$$

где  $\dot{\mathbf{E}}$ ,  $\dot{\mathbf{H}}$  — вектора напряженности электрического и магнитного поля в фокальной области;

$\dot{\mathbf{J}}$  — вектор поверхностной плотности токов, наведенных падающей плоской волной, на освещенной стороне зеркала;

$\bar{\mathbf{q}}_R$  — единичный вектор, направленный из точки на поверхности зеркала в точку фокальной области;

$R$  — расстояние от точки на поверхности зеркала до точки фокальной области (рис. 47).

Вектор плотности тока на поверхности зеркала связан с полем падающей волны следующими соотношениями:

$$\dot{\mathbf{J}} = 2[\bar{\mathbf{q}}_p, \dot{\mathbf{H}}_i], \quad (5)$$

где  $\bar{\mathbf{q}}_p$  — вектор нормали к внутренней поверхности зеркала,

$\dot{\mathbf{H}}_i$  — вектор напряженности магнитного поля падающей волны.

Проекция вектора нормали к внутренней поверхности параболоида запишутся в виде:

$$\bar{\mathbf{q}}_p = \bar{x}_0 q_{px} + \bar{y}_0 q_{py} + \bar{z}_0 q_{pz},$$

$$q_{px} = \frac{x_p}{2f \sqrt{1 + \frac{x_p^2}{4f^2} + \frac{z_p^2}{4f^2}}},$$

$$q_{py} = \frac{-1}{\sqrt{1 + \frac{x_p^2}{4f^2} + \frac{z_p^2}{4f^2}}},$$

$$q_{pz} = \frac{z_p}{2f \sqrt{1 + \frac{x_p^2}{4f^2} + \frac{z_p^2}{4f^2}}},$$



где  $x_p, y_p, z_p$  — координаты точки на поверхности параболоида;  $f$  — фокусное расстояние параболоида.

Проекции единичного вектора, направленного из точки на поверхности зеркала в точку фокальной области, можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{q}}_R &= \bar{x}_0 q_{Rx} + \bar{y}_0 q_{Ry} + \bar{z}_0 q_{Rz}, \\ q_{Rx} &= \frac{x_c - x_p}{\sqrt{(x_c - x_p)^2 + (y_c - y_p)^2 + (z_c - z_p)^2}}, \\ q_{Ry} &= \frac{y_c - y_p}{\sqrt{(x_c - x_p)^2 + (y_c - y_p)^2 + (z_c - z_p)^2}}, \\ q_{Rz} &= \frac{z_c - z_p}{\sqrt{(x_c - x_p)^2 + (y_c - y_p)^2 + (z_c - z_p)^2}},\end{aligned}$$

где  $x_c, y_c, z_c$  — координаты точки фокальной области, где определяется отраженное от зеркала поле.

Расстояние между точками на параболоиде и точками в фокальной области определяется в следующем виде:

$$R = [(x_c - x_p)^2 + (y_c - y_p)^2 + (z_c - z_p)^2]^{1/2}.$$

Вектор напряженности магнитного поля падающей на зеркало линейно-поляризованной плоской волны выражается следующим образом:

$$\dot{\mathbf{H}}_i = \bar{\mathbf{q}}_H H_i e^{j\Phi},$$

где  $\bar{\mathbf{q}}_H$  — единичный вектор, характеризующий поляризацию вектора  $H$ ,

$H_i$  — амплитуда вектора напряженности магнитного поля,

$\Phi$  — фаза вектора напряженности магнитного поля.

Величины  $\bar{\mathbf{q}}_H$  и  $\Phi$  можно связать с направлением распространения падающей на зеркало плоской волны. Единичный вектор, характеризующий направление распространения плоской волны, имеет следующий вид:

$$\bar{\mathbf{q}}_{\Pi} = \bar{x}_0 \sin\theta \cos\varphi + \bar{y}_0 \sin\theta \sin\varphi + \bar{z}_0 \cos\theta.$$

Следует отметить, что при  $\varphi = 90^\circ$  имеем фронт, плоскость падения которого совпадает с плоскостью симметрии.

Фаза вектора  $\dot{\mathbf{H}}_i$  запишется следующим образом:

$$\Phi = k(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{q}}_{\Pi}),$$

где  $\bar{\mathbf{r}}$  — вектор, направленный из начала координат в точку на зеркале; или

$$\Phi = k[-x_p \sin\theta \cos\varphi + y_p \sin\theta \sin\varphi - z_p \cos\theta].$$

Рассмотрим два случая взаимно перпендикулярной ориентации вектора напряженности магнитного поля падающей волны.

I.  $\dot{\mathbf{H}}_i^I$  перпендикулярен плоскости, проходящей через ось  $z$  и вектор  $\bar{\mathbf{q}}_{\Pi}$ , т. е.

$$\bar{\mathbf{q}}_H^I = \frac{[\bar{\mathbf{q}}_{\Pi}, \bar{z}_0]}{[\bar{\mathbf{q}}_{\Pi}, \bar{z}_0]}.$$

В этом случае вектор  $\dot{\mathbf{H}}_i^I$  имеет следующие составляющие:

$$\dot{H}_{ix}^I = -\sin\varphi e^{-j\Phi},$$

$$\dot{H}_{iy}^I = \cos\varphi e^{-j\Phi},$$

$$\dot{H}_{iz}^I = 0.$$

II.  $\dot{\mathbf{H}}_i^{II}$  лежит в плоскости, проходящей через ось  $z$  и вектор  $\bar{\mathbf{q}}_{\Pi}$ , т. е.

$$\bar{\mathbf{q}}_H^{II} = \frac{[\bar{\mathbf{q}}_{\Pi}, \bar{\mathbf{q}}_H^I]}{[\bar{\mathbf{q}}_{\Pi}, \bar{\mathbf{q}}_H^I]}.$$

В этом случае проекции вектора  $\dot{\mathbf{H}}_i^{II}$  запишутся в следующем виде:

$$\dot{H}_{ix}^{II} = \cos\theta \cos\varphi e^{-j\Phi},$$

$$\dot{H}_{iy}^{II} = \cos\theta \sin\varphi e^{-j\Phi},$$

$$\dot{H}_{iz}^{II} = -\sin\theta e^{-j\Phi}.$$

Таким образом, как видно из формул ((5) и т. д.) все члены подынтегральных выражений (3) и (4) связаны с переменными  $x, y, z, \theta, \varphi$ . Это позволяет вычислить при помощи ЭВМ составляющие  $\dot{E}_x, \dot{E}_y, \dot{E}_z, \dot{H}_x, \dot{H}_y, \dot{H}_z$  отраженного от зеркала поля в области фокуса для различных поляризаций вектора  $\dot{\mathbf{H}}_i$  падающей на зеркало плоской волны.

Распределение поля в фокальной плоскости в меридиональном сечении для разных углов  $\beta$  при углах падения плоской волны  $\theta_0 = 5^\circ, 12^\circ, 17^\circ$  изображены на рис. 48—50. Из них видно, что размер области наибольшей концентрации поля зависит от угла наклона фокальной плоскости, т. е. существует оптимальное значение угла  $\beta$ . На рис. 51—53 представлены линии постоянной амплитуды поля в фокальной плоскости для тех же углов наклона плоского фронта падающей на зеркало волны при  $\beta = 45^\circ$ .

Рассмотрим теперь процесс работы антенны в режиме передачи для зеркала, диаметром  $30\lambda$ .

Поскольку вырезка из параболоида вращения неосесимметричная антенна, то для ее облучения требуется специальное расположение облучателя как для осевого направления ДН, так и при сканировании.

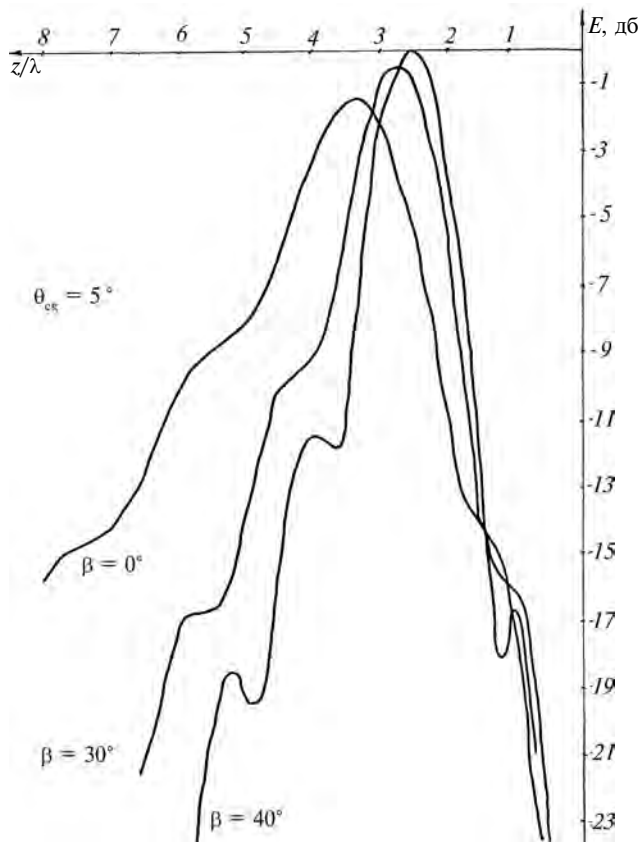


Рис. 48

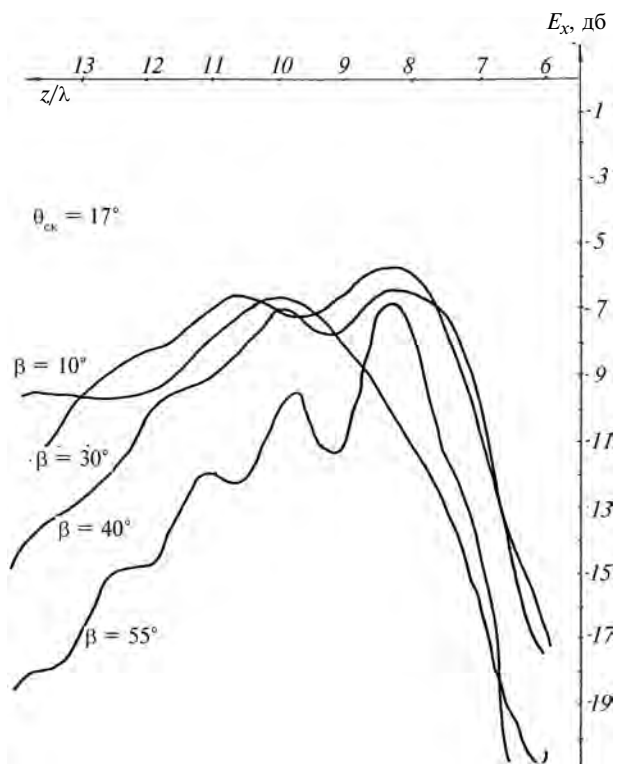


Рис. 50

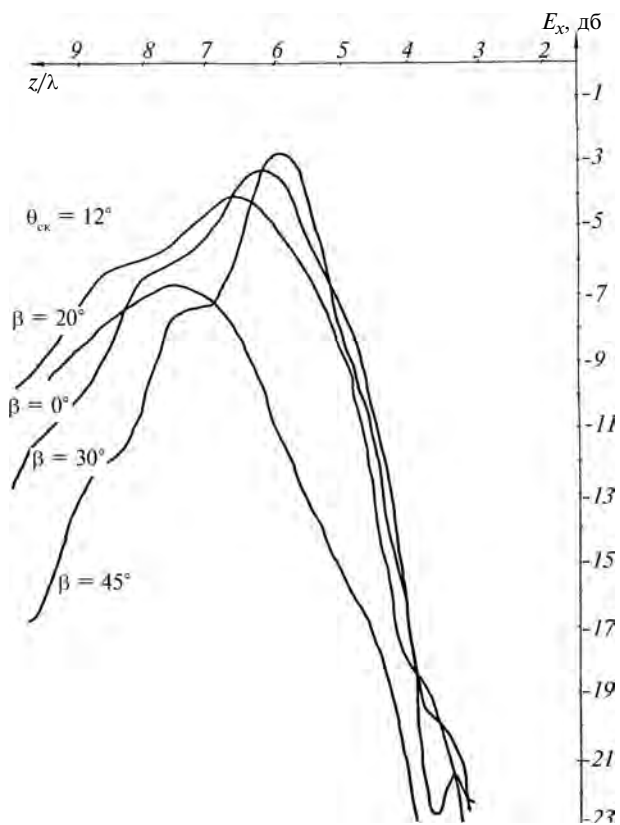


Рис. 49

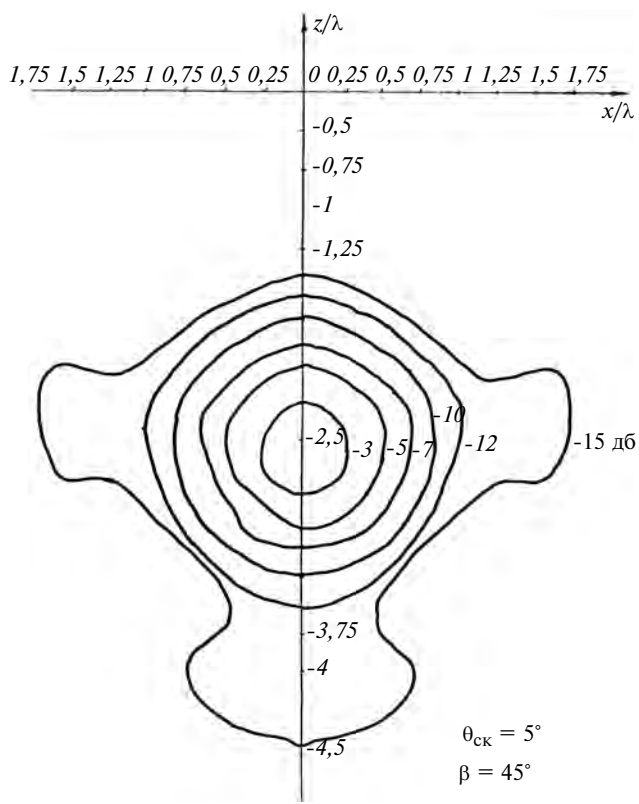


Рис. 51

Пусть  $\beta$  — угол между оптической осью параболоида, из которого сделана вырезка, и осью облучателя. На рис. 54 показано, как изменяется коэффициент усиления антенны в зависимости от угла  $\beta$  при расположении облучателя в фокусе для разных значений  $f/D$ , т. е. для разной кривизны зеркала. Как выясняется, не только кривизна зеркала влияет на величину оптимального угла  $\beta$ , но и размеры облучателя. Так, на рис. 54 одна кривая соответствует облучателю, который дает ослабление поля в направлении краев раскрыва на 10 дБ, а вторая кривая — коническому рупору диаметром  $\lambda$ .

Помимо расположения облучателя в фокусе целесообразно рассмотреть влияние угла  $\beta$  на сканирующие свойства антенны. В этом случае  $\beta$  — угол между плоскостью, в которой расположены облучатели, и осью антенны. На рис. 55 показано изменение усиления в зависимости от угла сканирования в плоскости симметрии зеркала при различных значениях  $\beta$  при  $f/D = 0,8$ . Например, из графика видно, что для угла сканирования  $\theta_{ск} = -6 \cdot 2\theta_{0,5}$  падение КНД не превышает 4,2 дБ при  $\beta = 40^\circ$ . Т. е. на основании приведенного графика можно выбрать оптимальный угол наклона плоскости расположения облучателей. На рис. 56—58 приведена серия ДН антенны при сканировании облучателя в плоскости симметрии при  $\beta = 20^\circ, 40^\circ, 56^\circ$ . Сплошной линией показано главное сечение ДН, пунктиром — сагиттальное. Эти ДН были рассчитаны для облучателя, который при расположении в фокусе, давал ослабление поля в направлении краев раскрыва на 10 дБ.

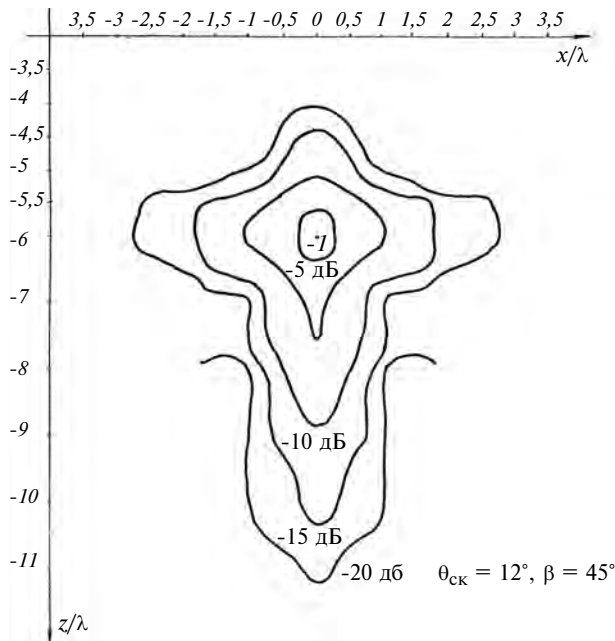


Рис. 52

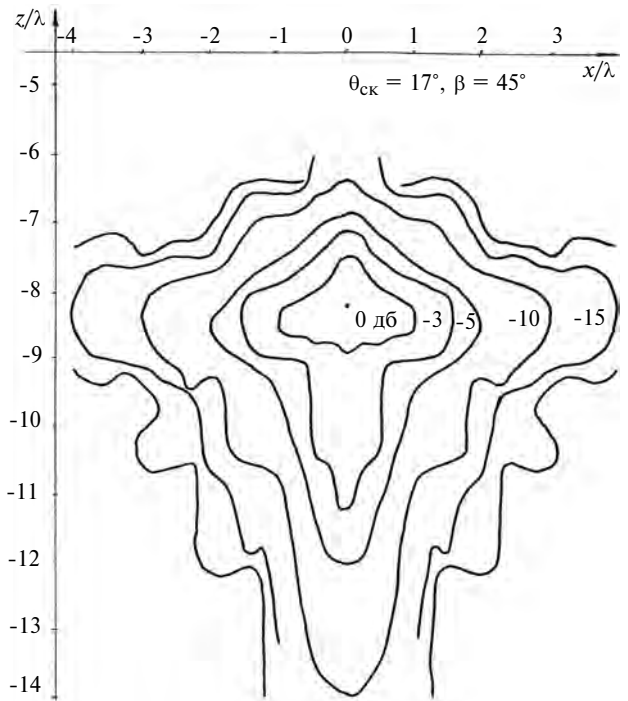


Рис. 53

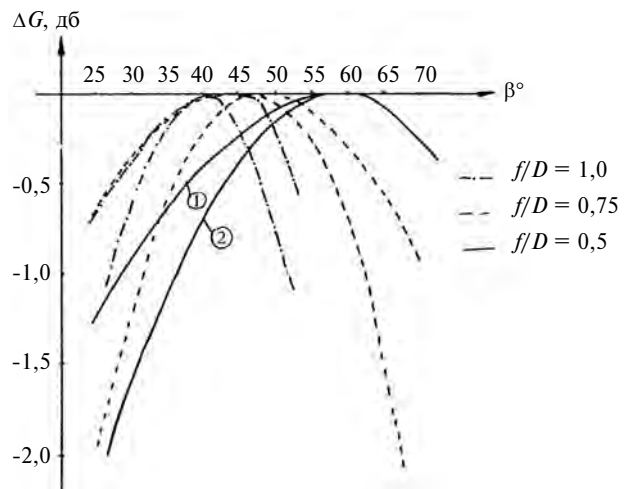


Рис. 54

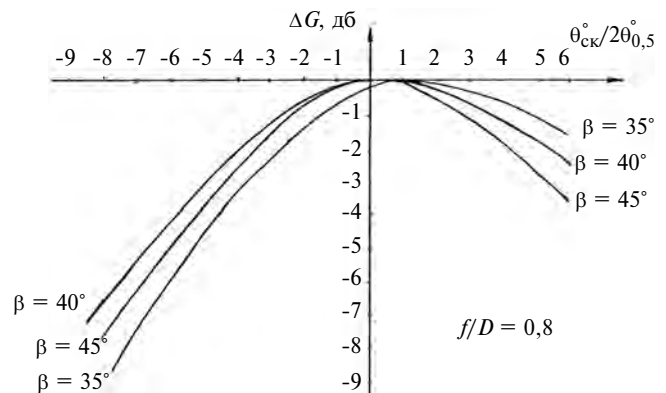


Рис. 55

На рис. 59 приведена зависимость ширины ДН на уровне половинной мощности ( $2\theta_{0,5}^\circ$ ) от угла сканирования в плоскости симметрии при  $\beta = 40^\circ$ . Видно, что при сканировании в пределах  $\pm 6 \cdot 2\theta_{0,5}^\circ$  ширина ДН увеличилась в полтора раза.

В ряде случаев к параболической антенне с вынесенным фокусом может предъявляться не только требование однолучевого сканирования, но и требование получения ДН специальной формы, например, столообразной ДН с плоской вершиной и максимальным значением крутизны скатов. С помощью одиночного облучателя этого можно достичь, если размеры раскрыва облучателя таковы, что поверхность зеркала будет облучаться не только главным лепестком его ДН, но и, по крайней мере, первыми боковыми. В этом случае на поверхности зеркала будут уча-

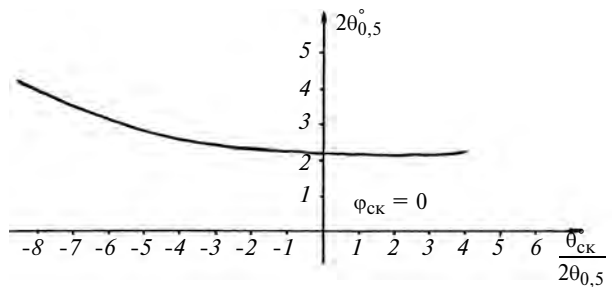


Рис. 59

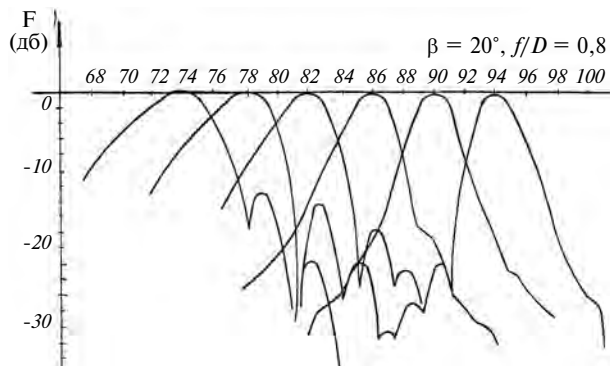


Рис. 56

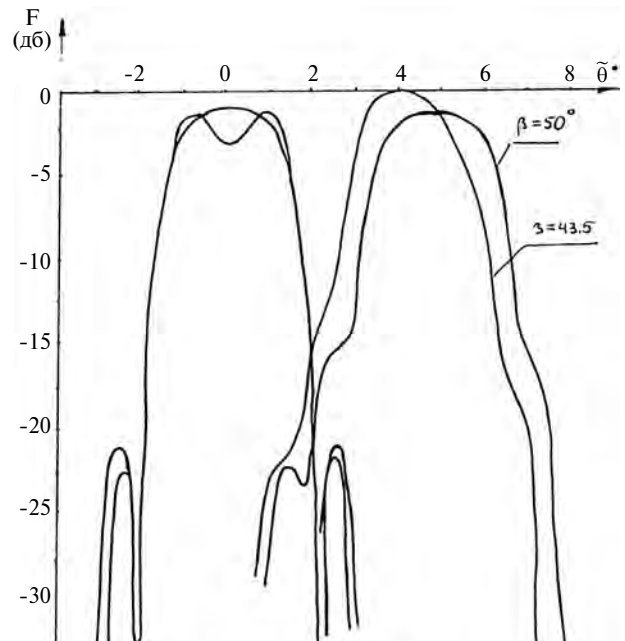


Рис. 60

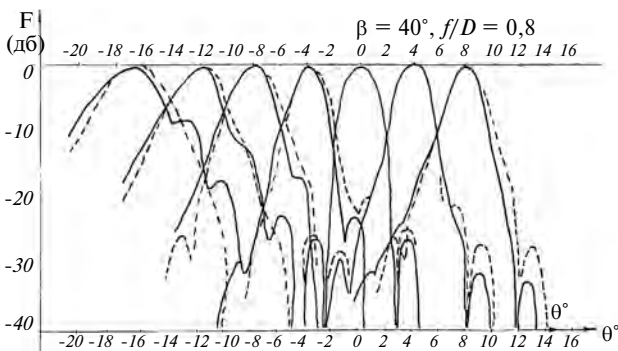


Рис. 57

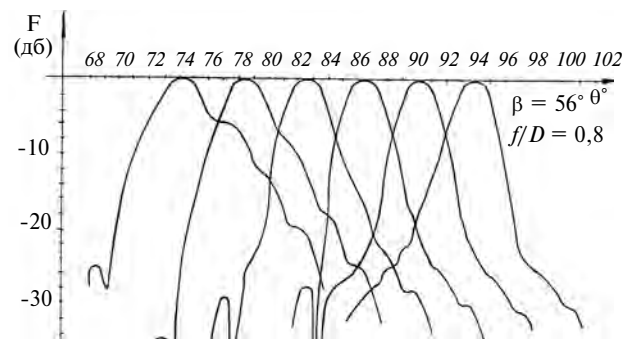


Рис. 58

стки с противофазными полями, что приводит к расширению ДН, которая одновременно приобретает и характерную столообразную форму. На рис. 60 представлены две пары ДН, для которых облучатель подобран по указанному принципу. Здесь графики 1 и 2 соответствуют расположению облучателя в фокусе, а графики 3 и 4 расположению облучателя вплотную к первому, т. е. при сканировании. При этом графики 1, 3 и 2, 4 отличаются углом  $\beta$ . Видимо, что форма ДН зависит не только от размеров раскрыва облучателя, но и от его ориентации. Параметры облучателя и антенны приведены на рисунке.

Влияние ширины ДН облучателя на форму ДН антенны дополнительно иллюстрируются рисунком 61, на котором представлены три серии графиков: средняя серия соответствует расположению облучателя в фокусе, а симметрично расположенные серии соответствуют сканированию в плоскости симметрии в обе стороны от фокуса. Каждая ДН в серии графиков получена для разного значения поля на краю раскрыва; эти значения указаны на рис. 61, также как и параметры антенны. Из рис. 61 видно, что столо-

образная ДН может быть сформирована в антенне с вынесенным фокусом, даже если она облучается одиночным облучателем, но сканирование таким облучателем практически непригодно, поскольку парциальные ДН в этом случае пересекаются на недопустимо низком уровне, и связь в направлениях пересечения парциальных лучей не будет обеспечиваться.

Таким образом, антенна с зеркалом в виде вырезки из параболоида вращения обеспечивает неискаженное сканирование в секторе  $\pm 2 \div 3$  ширины ДН. Увеличить сектор сканирования можно, используя многоэлементный облучатель. Рассмотрим процесс компенсации искажений ДН для произвольного угла сканирования в режиме передачи.

Как было показано, при смещении облучателя антенны из фокуса происходит отклонение ДН от главного направления. При использовании одиночного облучателя сканирование без существенного искажения формы ДН возможно только в пределах угла в  $2 \div 3$  ширины ДН. Если перемещать одиночный облучатель по оптимальной (криволинейной) фокальной поверхности, то угол сканирования может быть увеличен до  $3 \div 4$  ширины ДН. При дальнейшем увеличении угла сканирования происходит чрезмерное расширение луча, возрастание уровня боковых лепестков — падение коэффициента усиления антенны.

Пусть ДН антенны в виде вырезки из параболоида вращения отклонена на угол  $12^\circ$ , что составляет примерно 6 ширины ДН. Она представлена на рис. 63 кривая III. Видно, что форма ДН существенно искажена.

Рассмотрим возможность улучшения формы ДН с помощью запитки дополнительных облучателей. Эта задача представляет собой задачу синтеза ДН с улучшенными характеристиками. Она обычно решается с применением различных методов организованного перебора и требует использования ЭВМ с большим объемом памяти. Возможен более оптимальный алгоритм синтеза — метод "собственной фазы", который будет рассмотрен ниже.

Диаграмму направленности, форму которой необходимо исправить, будем называть оптимизируемой, а соседние с ней — оптимизирующими. Сначала рассмотрим решетку из рупорных облучателей диаметром  $2\lambda$ , которые обеспечивают максимум КНД при расположении в фокусе. На рис. 62 в качестве примера представлена серия суммарных ДН при одновременной запитке 3-х соседних облучателей при различных значениях амплитуды и фазы возбуждения облучателей, соответствующих оптимизирующим ДН. Видно, что в зависимости от фазовых соотношений (при выбранных значениях амплитуд) суммарная ДН существенно изменяется. Для определения необходимого закона возбуждения вспомогательных облучателей и достижения высокой эффективно-

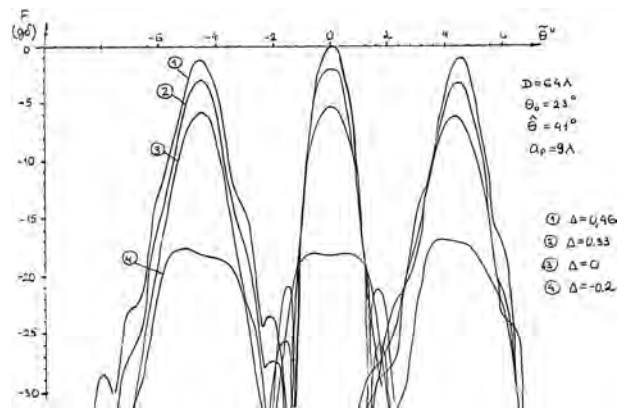


Рис. 61

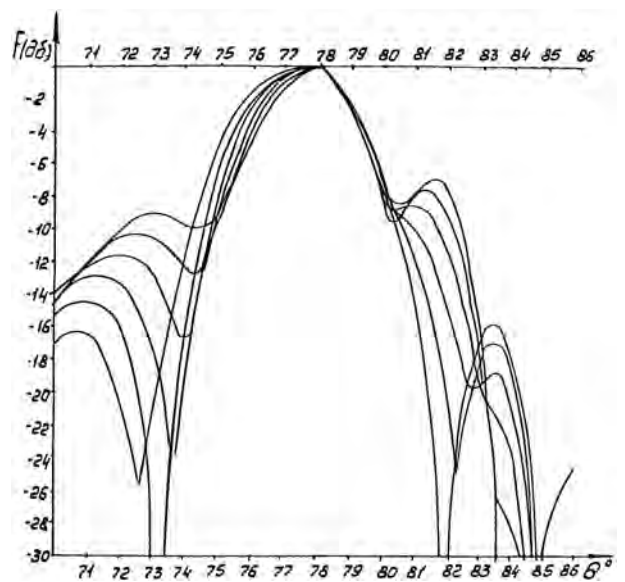


Рис. 62

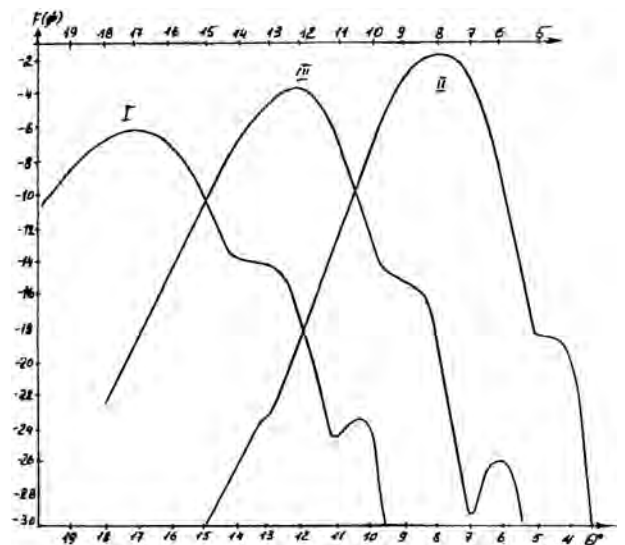


Рис. 63

сти антенн для заданного угла сканирования необходимо предварительно проанализировать амплитудные и фазовые диаграммы всех трех лучей. На рис. 63 приведены оптимизируемая III и оптимизирующие I и II амплитудные диаграммы направленности. На рис. 64 представлены фазовые диаграммы оптимизирующих лучей. В первом приближении процесс оптимизации можно производить отдельно для левой и правой частей оптимизируемого луча, то есть отдельно рассматривать взаимодействие оптимизируемого луча III с правой II и левой I ДН. Это допустимо,

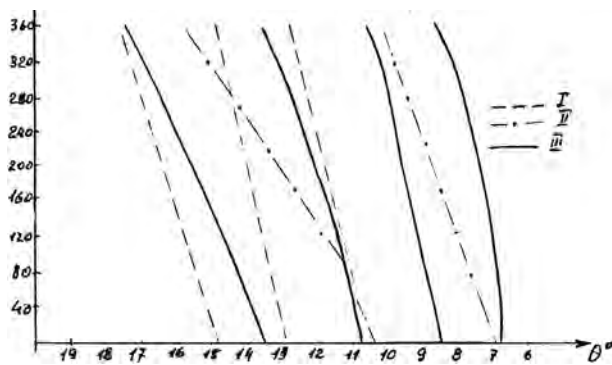


Рис. 64

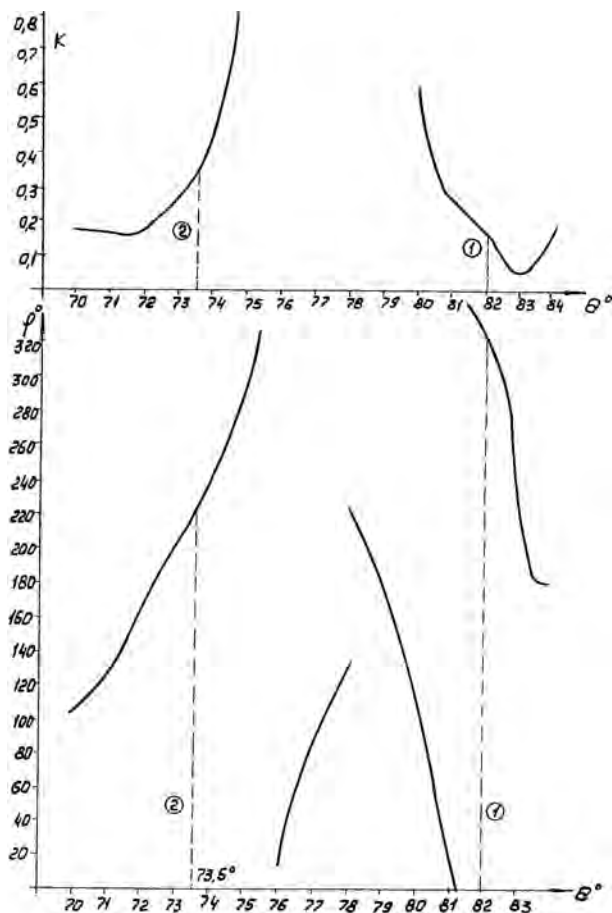


Рис. 65

так как в области, смежной для оптимизируемого и левого оптимизирующего луча, напряженность поля, создаваемого правым оптимизирующим лучом, достаточно мала и наоборот.

Пусть необходимо увеличить крутизну левого склона оптимизируемой ДН. Это значит, что надо в направлении  $\hat{\theta}$ , расположенном в пределах углов  $70^\circ < \hat{\theta} < 78^\circ$ , получить значение напряженности поля, не превышающее заданной величины. Считаем, что облучатель, создающий оптимизируемую ДН, возбужден полем с единичной амплитудой и нулевой фазой.

Для того чтобы рассчитать амплитудный коэффициент возбуждения и фазу запитки соответствующего облучателя, необходимо в соответствии с методом "собственной фазы" вычислить амплитуду поля оптимизируемого луча, а также фазы оптимизируемого и оптимизирующего лучей в данном направлении  $\hat{\theta}$ . Для получения нулевого значения суммарного поля в направлении  $\hat{\theta}$  к полю оптимизируемого луча в этом направлении необходимо прибавить такое же по амплитуде поле оптимизирующего луча, но с противоположной фазой. То есть должно выполняться следующее условие.

$$E_{\Sigma}(\hat{\theta}) = E_{\text{opt}}(\hat{\theta})e^{i\varphi_{\text{opt}}} + E_{\text{доп}}(\hat{\theta})K_{\text{доп}}e^{i(\Psi_{\text{доп}} + \varphi_{\text{доп}})} = 0,$$

где  $K_{\text{доп}}$ ,  $\Psi_{\text{доп}}$  — амплитудный коэффициент и фаза возбуждения соответствующей оптимизирующей ДН,

$$K_{\text{доп}} = \frac{E_{\text{opt}}(\hat{\theta})}{E_{\text{доп}}(\hat{\theta})},$$

$$\Psi_{\text{доп}} = \varphi_{\text{opt}}(\hat{\theta}) - \varphi_{\text{доп}}(\hat{\theta}) + \pi.$$

где  $E_{\text{opt}}(\hat{\theta})$ ,  $\varphi_{\text{opt}}(\hat{\theta})$  — амплитуда и фаза напряженности поля оптимизируемого луча в направлении  $\hat{\theta}$ .

$E_{\text{доп}}(\hat{\theta})$ ,  $\varphi_{\text{доп}}(\hat{\theta})$  — амплитуда и фаза напряженности поля оптимизирующего луча в направлении  $\hat{\theta}$  при запитке его полем с единичной амплитудой и нулевой фазой.

Например, чтобы получить нули суммарной ДН в направлении  $\hat{\theta} = 82^\circ$  и  $\hat{\theta} = 73,5^\circ$ , необходимо облучатель, соответствующий правой оптимизирующей ДН, возбудить с амплитудным коэффициентом  $K_{\text{доп}} = 0,15$ , и фазой  $\Psi_{\text{доп}} = 325^\circ$ , а левой соответственно  $K_{\text{доп}} = 0,35$ ,  $\Psi_{\text{доп}} = 220^\circ$  (рис. 65). Суммарная ДН приведена на рис. 66. Как видно из рисунка, ДН в направлениях  $73,5^\circ$  и  $83^\circ$  имеет нули.

Таким образом, для получения нуля в любом, наперед заданном направлении оптимизируемой ДН, необходимо иметь зависимости (графики, таблицы)  $K_{\text{доп}}$  и  $\Psi_{\text{доп}}$  от  $\theta$ , т. е. функции амплитудного и фазового коэффициентов (рис. 65).

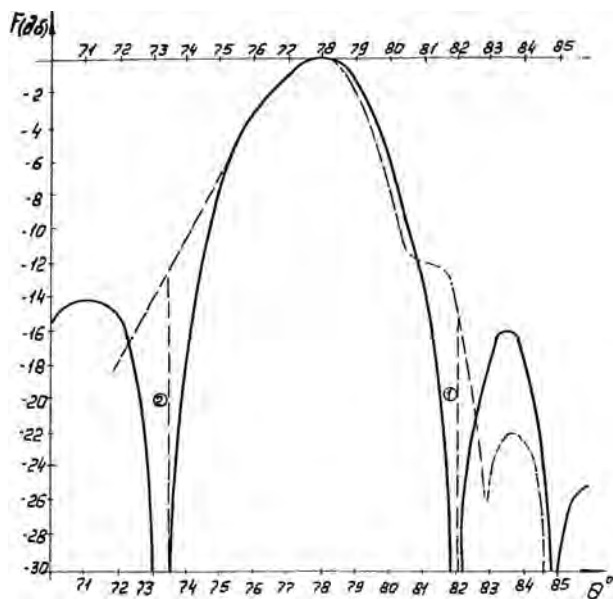


Рис. 66

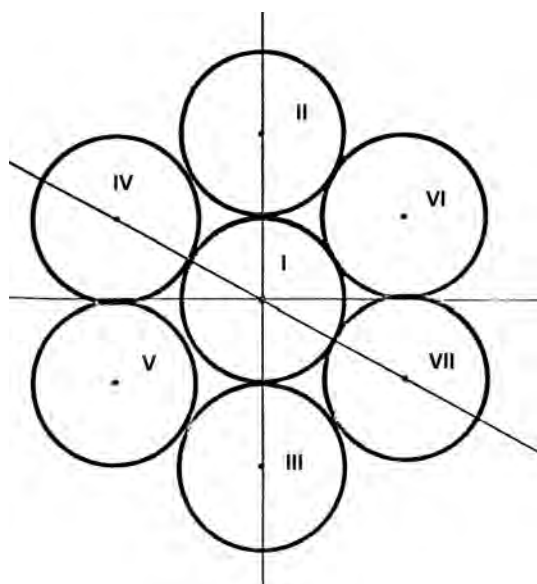


Рис. 67

Рассмотрим далее процесс оптимизации с помощью группы рупоров диаметром  $0,8\lambda$ , схема расположения которых приведена на рис. 67. Эта группа из семи рупоров может располагаться в любом месте облучающей решетки.

Пусть облучатель I соответствует некоторому направлению, для которого производится оптимизация. Процесс оптимизации можно производить отдельно по сечениям ДН, проходящим через максимумы оптимизируемого и соседних с ним оптимизирующих лучей. Например, II, I, III и IV, I, VII. На рис. 68—70 приведены соответствующие ДН. В качестве примера рассмотрим процесс оптимизации ДН (I), приведенной на рис. 63.

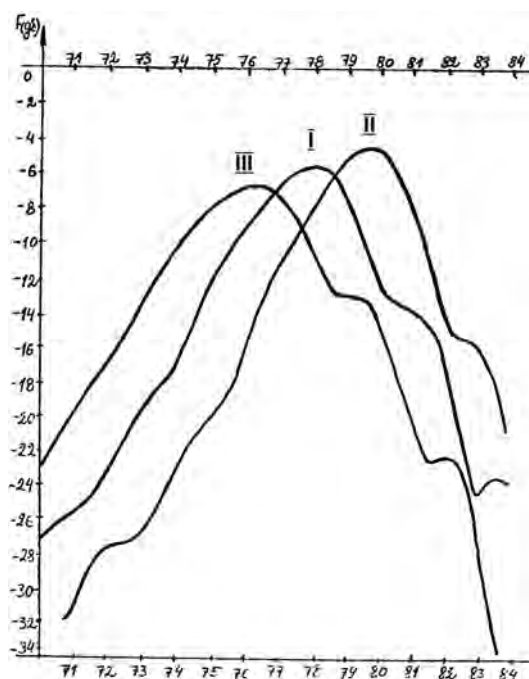


Рис. 68

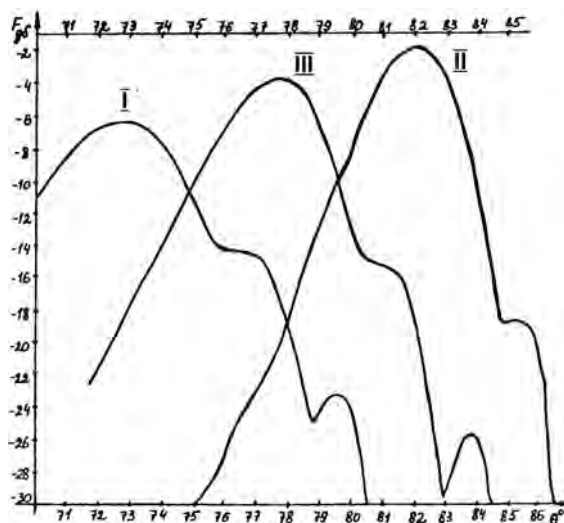


Рис. 69

На рис. 71 представлены графики необходимых значений  $K_{\text{доп}}$  и  $\Psi_{\text{доп}}$ . Предположим, что необходимо обеспечить нули ДН в направлениях  $\hat{\theta} = 73^\circ$ ,  $\tilde{\theta} = 81^\circ$ . В соответствии с графиками рис. 71 облучатель III необходимо возбудить с амплитудным коэффициентом  $K_{\text{доп}} = 0,6$ , с фазой  $\varphi_{\text{доп}} = 172^\circ$ , а для облучателя II  $K_{\text{доп}} = 0,55$ ,  $\Psi_{\text{доп}} = 52^\circ$ . Формулы для  $K_{\text{доп}}$  и  $\Psi_{\text{доп}}$  соответствуют случаю учета поля только одного соседнего с оптимизируемым луча, который мы будем называть основным оптимизирующим лучом.

Если необходимо учесть поля всех лучей, создающих поле в оптимизируемом направлении, то необходимо использовать следующее

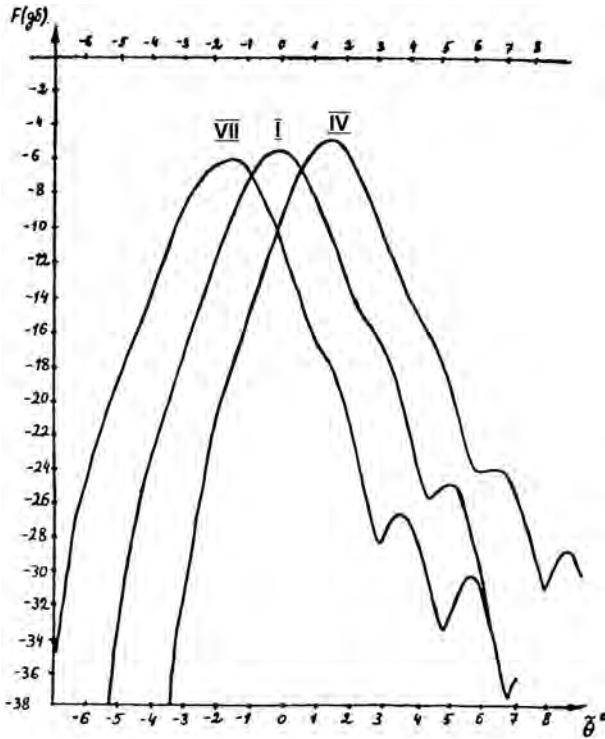


Рис. 70

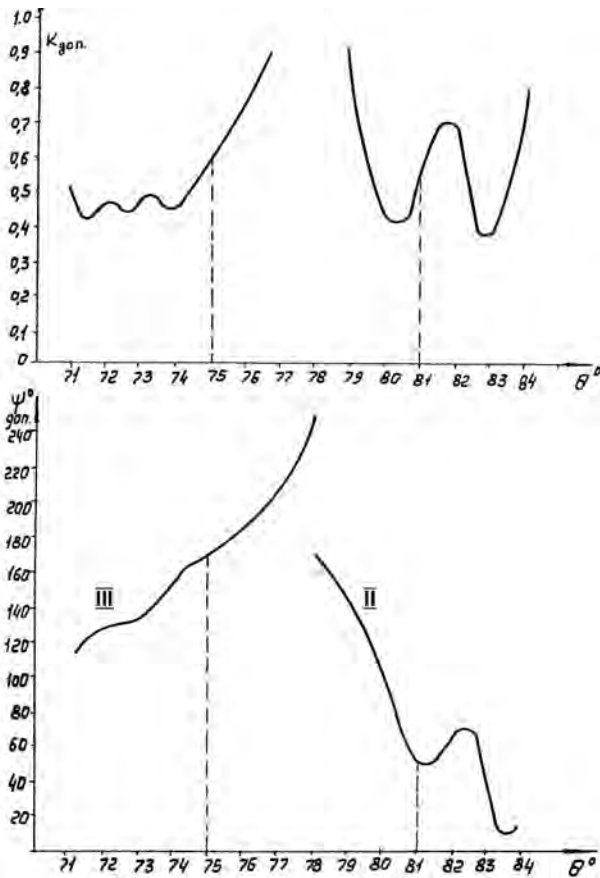


Рис. 71

соотношение для функции амплитудного коэффициента возбуждения  $i$ -го луча.

$$K_{доп i} = \frac{\sum_{n=1}^N E_n(\theta_0, \varphi_0)}{E_{доп i}(\theta_0, \varphi_0)}$$

Здесь в числителе стоит амплитуда суммарного поля, создаваемого при помощи всех облучателей, кроме основного оптимизирующего луча. В знаменателе стоит амплитуда поля основного оптимизирующего луча в произвольном направлении оптимизации.

$$\Psi_{доп i} = \varphi_{доп i}(\theta_0, \varphi_0) - \varphi_{\Sigma}(\theta_0, \varphi_0) + \pi,$$

где  $\varphi_{доп}(\theta_0, \varphi_0)$  — фаза поля оптимизирующего луча в том же направлении;

$\varphi_{\Sigma}(\theta_0, \varphi_0)$  — фаза суммарного поля, причем суммируются поля, создаваемые при помощи всех облучателей, кроме основного оптимизирующего, в направлении оптимизации.

Помимо необходимости формирования нулей в заданных направлениях в системе связи может возникнуть необходимость максимальной концентрации излучения в одном направлении, что соответствует максимизации КНД для данного направления. Казалось бы, что в этом направлении все поля должны складываться в одинаковой фазе. Однако анализ ДН на рис. 69 показывает, что если необходимо получить наибольшее поле, например, в направлении  $\sim 12^\circ$ , то при синфазном и равноамплитудном сложении полей, соответствующих лучам I, II, III именно в этом направлении с учетом фазовых ДН (рис. 64) получим широкую ДН с низким КНД, поскольку в направлении  $\sim 12^\circ$  вклад полей от лучей I и II незначителен, зато в направлениях  $\sim 18^\circ$  и  $\sim 8^\circ$ , наоборот, основное поле создают лучи I и II соответственно.

Отметим, что ДН на рис. 69 пересекаются на низком уровне ( $-8\dots-10$  дБ). В этом случае более логично требовать не сложения полей лучей I и II в направлении  $\sim 12^\circ$ , а вычитания полей лучей I и II из поля луча III при таком выборе коэффициентов возбуждения лучей I и II, чтобы имела место наибольшая компенсация полей на скатах луча III. В результате этой процедуры будет получена более узкая ДН (луч III) и, как следствие, более высокий КНД. Соответствующая ДН представлена на рис. 72.

Рассмотрим далее случай, когда источник помех находится в пределах главного лепестка ДН приемной антенны, например, в пределах контурного луча, образованного на базе серии узких парциальных лучей. Реализация нулей в главном лепестке может быть осуществлена с помощью антенной решетки как таковой и с помощью зеркальной антенны, облучаемой решеткой, когда каждому облучателю соответствует парциальный луч.



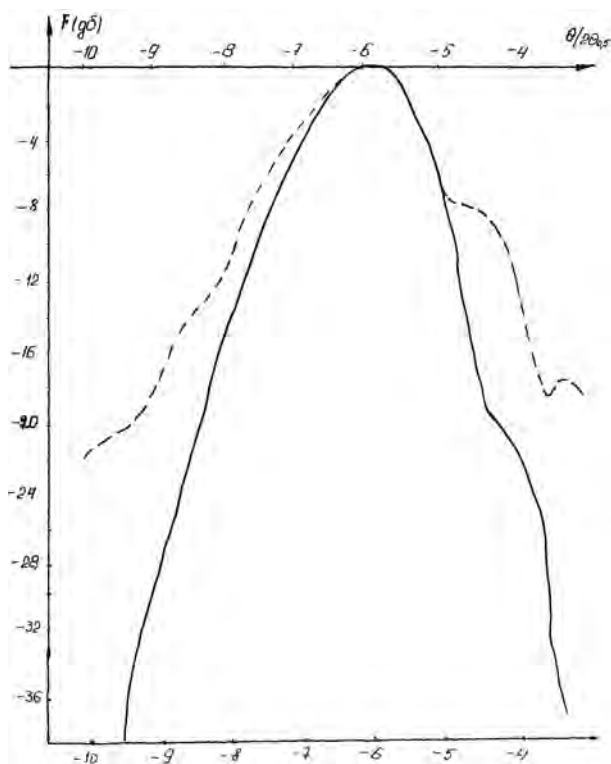


Рис. 72

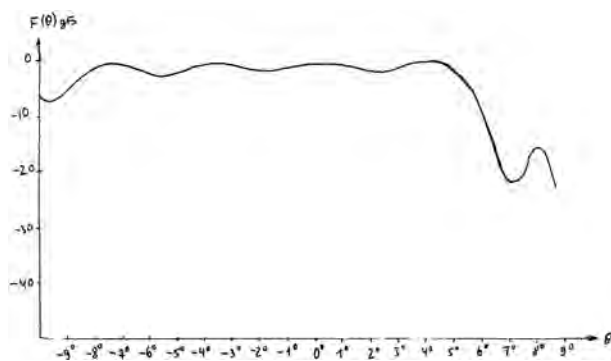


Рис. 73

Простое отключение одного, двух или трех соседних парциальных лучей позволяет ослабить мешающий сигнал, источник которого расположен в любой точке зоны обзора ценой потери связи в пределах сектора, занимаемого отключаемыми лучами. Регулируемое возбуждение ряда соседних лучей вместо их простого выключения позволяет снизить уровень помехи в любой точке зоны обзора и значительно уменьшить угловую ширину нуля, т. е. области, в пределах которой нарушается прием как сигнала помехи (что желательно), так и любого другого сигнала, в том числе и полезного (что нежелательно). В этом случае формировать нули в пределах главного лепестка можно путем соответствующего возбуждения тех парциальных лучей, для которых направление на помеху является смежным. Пусть контурный луч в одном из се-

чений представлен в исходном виде на рис. 69. Пусть нуль последовательно формируется в пределах двух градусов, перемещаясь от  $12^\circ$  до  $14^\circ$  (рис. 74). В формировании этого нуля принимают участие три парциальных луча (см. рис. 69), которые занимают сектор от  $4^\circ$  до  $25^\circ$ , и в этих пределах формирование второго нуля невозможно. Видна последовательная деформация ДН по соседству с нулем; эту деформацию, сопровождающуюся изменением КНД, необходимо учитывать при организации связи в системе с адаптивной антенной.

В заключение приведем некоторые конструкции реальных многолучевых антенн — тороидальной и мультифидной. В последней антенне происходит отклонение лучей в плоскости, перпендикулярной ее плоскости симметрии — т. е. в сагиттальной плоскости.

Антенна "SimulSat" представляет собой прямоугольное сечение сферической поверхности размером  $9,8 \times 5$  м и выполнена из стеклопластика. Вдоль фокальной линии антенны расположены облучатели, позволяющие принимать сигналы в С и Ku-диапазонах частот с 35 спутников одновременно. Каждый канал эквивалентен отдельной антенне диаметром  $3,5 \div 4,5$  м. Шири-

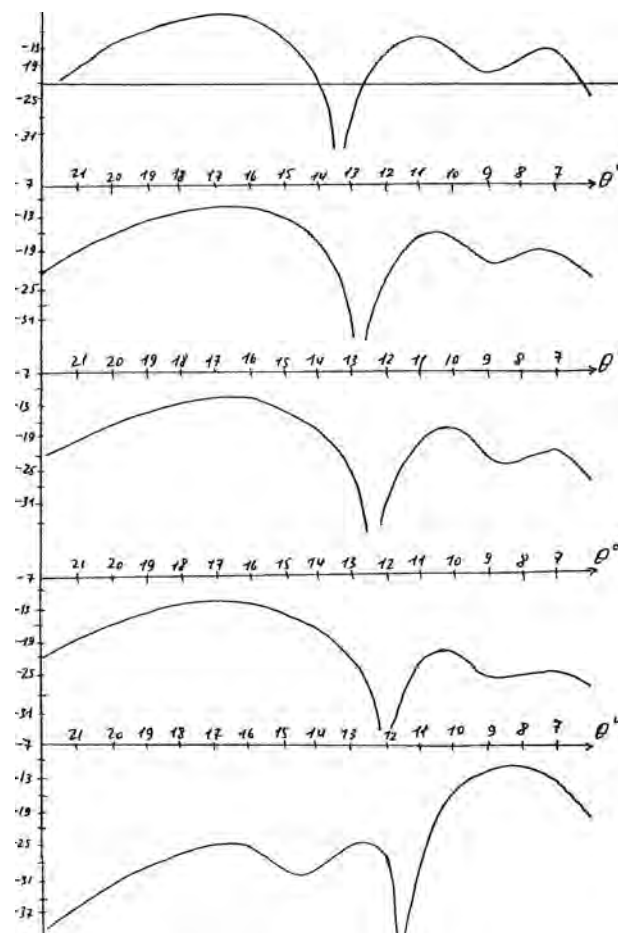


Рис. 74



Рис. 75

на ДН лучей антенны  $1^\circ$  в С-диапазоне и  $0,4^\circ$  в Ku-диапазоне. Антенна представлена на рис. 75.

Зеркальные антенны в виде вырезки из параболоида вращения (рис. 76) широко применяются в качестве антенн для приема спутникового TV, причем потенциально интересные программы могут передаваться с разных спутников, находящихся на стационарной орбите на некотором угловом удалении друг от друга. Конечно, можно использовать столько приемных антенн, сколько



Рис. 76

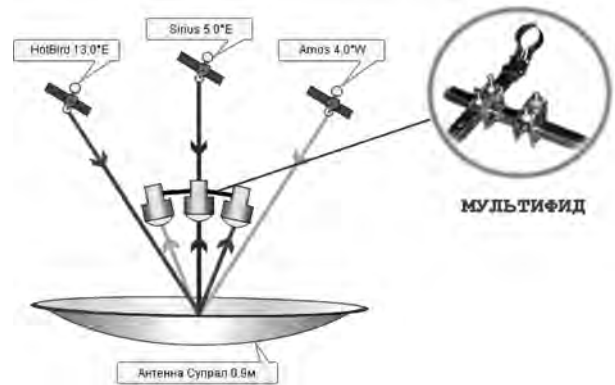


Рис. 78

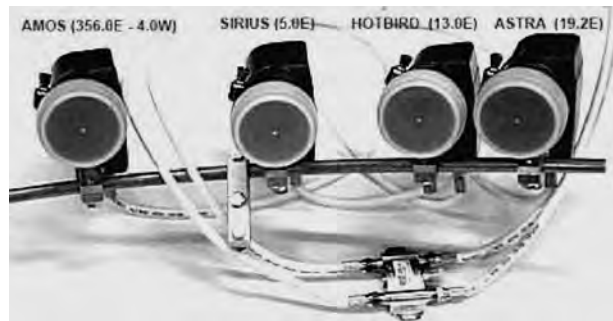


Рис. 79



Рис. 77



Рис. 80

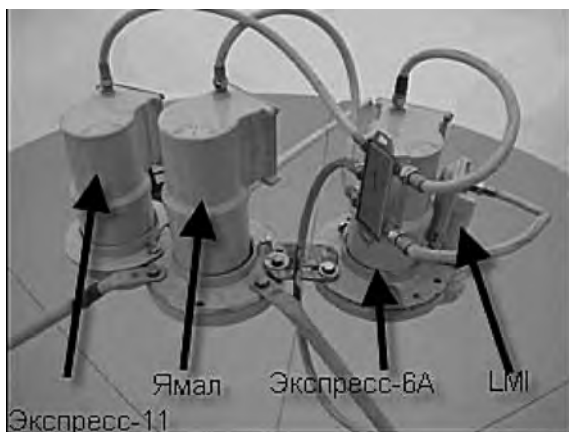


Рис. 81

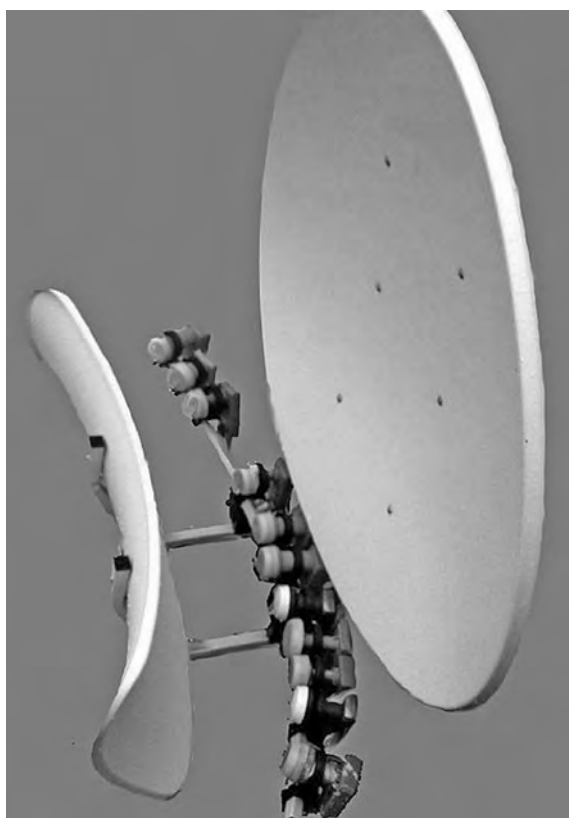


Рис. 81, а



Рис. 82



Рис. 82, а

спутников интересуют потребителя. Однако, учитывая немалую стоимость соответствующей аппаратуры, желательно использовать одну и ту же антенну, но с разными облучателями — конвертерами (рис. 77). Такая система конвертеров получила название "мультифидной", что в свободном переводе означает "многофидерная". Например, возможен прием русскоязычных программ со спутников Astra, Hotbird, Sirius и Amos, расположенных на орбите в соответствии с рис. 78 и рис. 79. Возможно также построить мультифид для приема передач со спутников Ямал, Экспресс-11, Экспресс-6А и LMY. Антенна

с мультифидом и отдельно мультифид показаны на рис. 80 и рис. 81. Возможна двухзеркальная тороидная антенна для работы с мультифидом (рис. 81, а) и однозеркальная, показанная на рис. 82.

В последнее время появились даже компьютерные программы для расчета углов места и азимута различных спутников, например программа с сайта <http://www.Sathunter.com>, незаменимая для продвинутых пользователей мультифидных систем.

В качестве новых антенн можно отметить также так называемые WiFi-антенны (рис. 82, а).

## МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МОНОЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ

Кроме зеркал, поверхности которых образованы только вращением кривых второго порядка, используются также однозеркальные рефлекторы более сложного устройства.

Известны антенны, поверхность которых получается путем перемещения заданной кривой (рис. 83). В простейшем случае получается тороидальная антенна, поверхность которой образована вращением дуги окружности (рис. 84)  $a, b, c$  вокруг оси  $ZZ$ , лежащей в плоскости этой окружности, причем центр образующей окружности может быть смещен с оси вращения. В част-

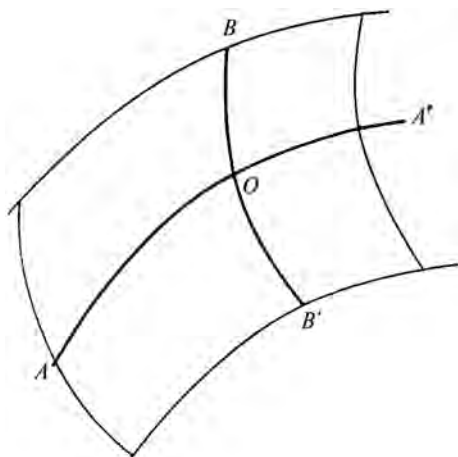


Рис. 83

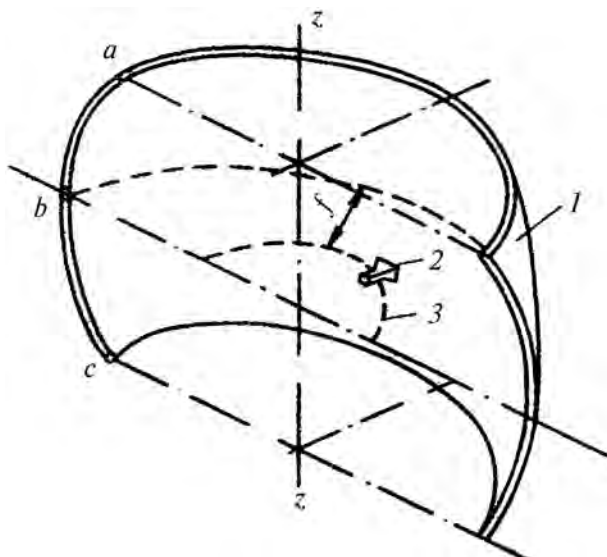


Рис. 84

ном случае, когда смещение центра образующей равно нулю, тороид превращается в сферическое зеркало. Тороидально-параболический рефлектор отличается тем, что поверхность зеркала образована вращением не отрезка окружности, а отрезка параболы относительно оси, перпендикулярной к оси параболы и лежащей с ней в одной плоскости (т. е. дуга  $abc$  на рис. 84 — отрезок параболы, который вращается вокруг оси  $ZZ$ ). Фокус образующей параболы может совпадать с "фокусом" окружности, образованным вращением вершины параболы. В этом случае достигается полная фокусировка в плоскости параболы.

Известна интересная модификация замкнутого тороида, образованного путем вращения сектора параболоида вокруг вертикальной оси. Поверхность тороида (рис. 85) конструктивно выполнена в виде системы параллельных проводов, ориентированных под углом  $45^\circ$  к вертикали. Такая конструкция при соответствующей поляризации источника излучения позволяет лучам после отражения от "освещенной" части поверхности рефлектора свободно проходить через его противоположную поверхность. В этом случае можно обеспечить сканирование ДН на  $360^\circ$  в горизонтальной плоскости.

В ряде случаев возникает необходимость в многолучевой антенне для приема излучения от ряда ИСЗ, расположенных на геостационарной орбите. При этом антенная система должна обеспечить заданные пределы перекрытия геостационарной орбиты, размещение вдоль орбиты необходимого количества парциальных лучей и выполнение требований по электрическим параметрам антенны для всех парциальных лучей.



Рис. 85

Этим требованиям соответствуют тороидально-параболические рефлекторы, если их плоскость симметрии расположить в плоскости геостационарной орбиты.

В зависимости от содержания конкретных задач, которые ставятся перед такими антеннами, и количества ИСЗ, от которых необходимо получить информацию, выбирается размер рабочей поверхности тороида, образованной вращением параболической дуги на тот или иной угол. Если тороид получается вращением параболической дуги на угол  $120^{\circ}$ — $180^{\circ}$  (полутороид), то антенна пригодна для широкоугольного перекрытия требуемого сектора обзора, причем каждый отдельный облучатель облучает только часть поверхности рефлектора. При этом облучатели не лежат на пути лучей, отражаемых тороидальной поверхностью ни в режиме приема, ни в режиме передачи: получается тороид с вынесенным фокусом (рис. 86—87). Очевидно, полутороид с вынесенным фокусом обеспечивает наиболее широкий обзор (до  $\pm 90^{\circ}$ ), но на границах этого сектора происходит "перелив" значительной доли энергии за края раскрыва зеркала и происходит частичное затенение отражения от зеркала лучей противоположной частью зеркала. Поэтому обычно допустимый сектор сканирования составляет  $\sim 120^{\circ}$ . В целом достоинством такой антенны является то, что отдельные облучатели облучают практически всю поверхность зеркала, что повышает эффективность использования антенны, да и сам угол сканирования существенно превышает аналогичный параметр чисто параболического зеркала. Помимо зеркал с "гладкой" и непрерывной поверхностью, в ряде случаев "гладкое" зеркало может быть заменено ступенчатым с целью получения новых полезных свойств. Идея в простейшем случае состоит в следующем. Сплошная отражающая поверхность параболоида вращения заменяется набором отдельных кольцевых зон, центры которых лежат на

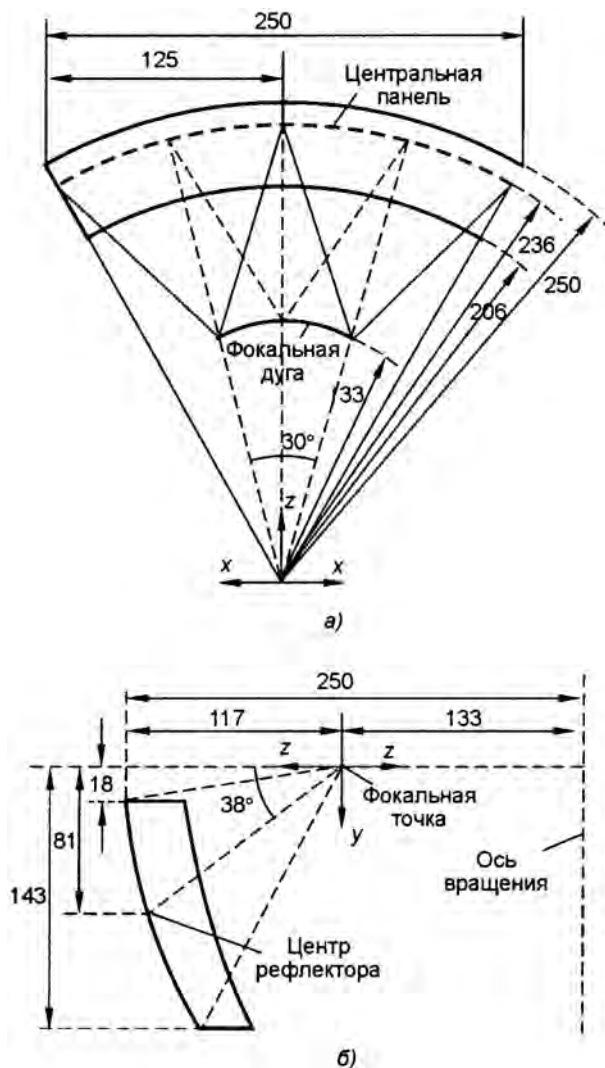


Рис. 87

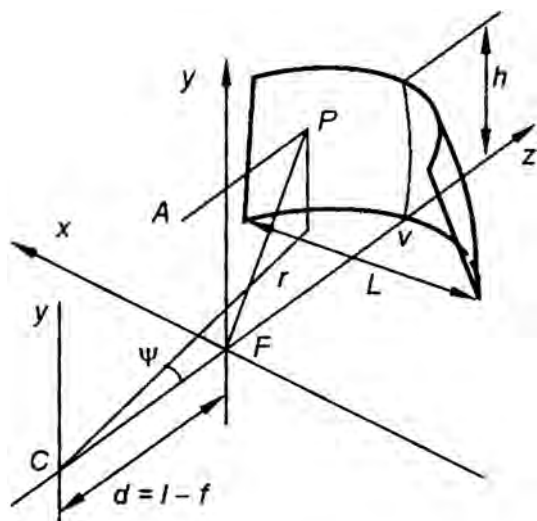


Рис. 86

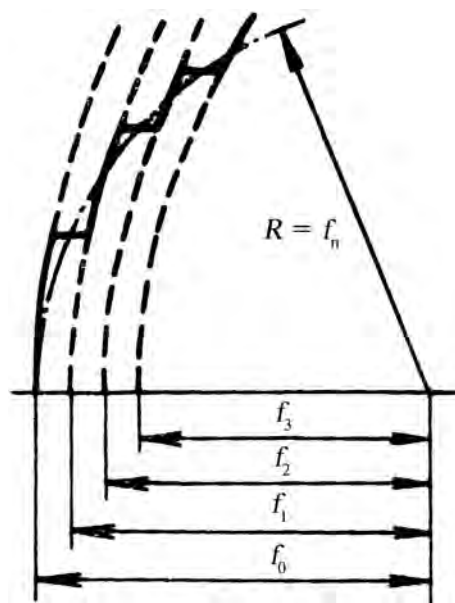


Рис. 88

окружности (рис. 88) с центром в точке расположения облучателя. Для обеспечения условия фокусировки каждая зона представляет собой поверхность параболоида, причем поля, отраженные от отдельных зон, отличаются по фазе на  $360^\circ$ . Выбор окружности в качестве кривой, на которой располагаются центры зон, объясняется стремлением выполнить условие синусов Аббе для телескопических систем. Хотя это условие, строго говоря, в приведенной конструкции зонированной антенны выполняется только для центральных точек каждой зоны, анализ показал, что такое зеркало обладает повышенными сканирующими свойствами по сравнению с "гладкими" параболоидами. Недостатком зонированного зеркала является его узкополосность и конструктивная сложность.

К зеркалам с несплошной поверхностью можно отнести зеркала с поворотом плоскости поляризации или с преобразованием поляризации. Принцип действия таких зеркал можно пояснить с помощью рис. 89. Здесь  $1$  — сплошная металлическая поверхность, на которой установлена решетка  $2$  из параллельных металлических пластин шириной  $\lambda/4$ , плоскость которых перпендикулярна поверхности  $1$ . Пусть на решетку падает линейно поляризованное поле, вектор  $E_1$  которого образует  $45^\circ$  с плоскостью пластин. Разложим вектор  $E_1$  на две составляющие —  $E_{\parallel}$ , параллельную пластинам, и  $E_{\perp}$  — перпендикулярную им. Поле  $E_{\parallel}$  отразится от торцов пластин, т. к. оно не может распространяться между пластинами, расстояние между которыми  $\ll \lambda$ , а поле  $E_{\perp}$  отражается от сплошной металлической поверхности. Поляризация поля  $E_{\parallel}$  к моменту прихода составляющей  $E_{\perp}$  к торцам пластин после отражения от металлической поверхности станет  $E'_{\parallel}$  (рис. 89). В итоге поляризация отра-

женного от такой конструкции поля оказывается повернутой на  $90^\circ$  по отношению к поляризации падающего поля. Этот принцип лежит в основе работы двухзеркальных антенн с поворотом плоскости поляризации. Примером такого рода антенн является рис. 89. Здесь  $1$  — вспомогательное зеркало, выполненное из вертикальных проводов или пластин, расстояние между которыми  $\ll \lambda$ , и главное плоское зеркало, выполненное из металлических пластин на сплошной подложке и расположенных под углом  $45^\circ$  к вертикали. Форма вспомогательного зеркала — параболоид. Видно, что поляризация поля, падающего на вспомогательное зеркало от облучателя  $E_{\text{пад}}$ , параллельна пластинам (проводам) и поэтому отражается от него в направлении главного зеркала. Поскольку произошел поворот поляризации на  $90^\circ$ , поле проходит сквозь главное зеркало. Конструкция по схеме рис. 89 часто используется для качания ДН в широком секторе углов путем наклона главного — плоского зеркала относительно точки  $F$ . Искажения при сканировании в такой системе отсутствуют, и она используется в составе РЛС поиска и сопровождения цели некоторых типов боевых самолетов. Процесс сканирования поясняется рисунком 90.

В ряде современных РЛС зенитно-ракетных комплексов находят применение отражательные фазированные решетки, в которых используется зеркало с установленными на нем соединенные с отражательными фазовращателями облучатели (рис. 91), закороченные со стороны, противоположной раскрытию. Фазовращатели обеспечивают получение плоского фронта после отражения от решетки с фазовращателями и сканирования в необходимом секторе углов. Очень важным достоинством такой схемы ФАР

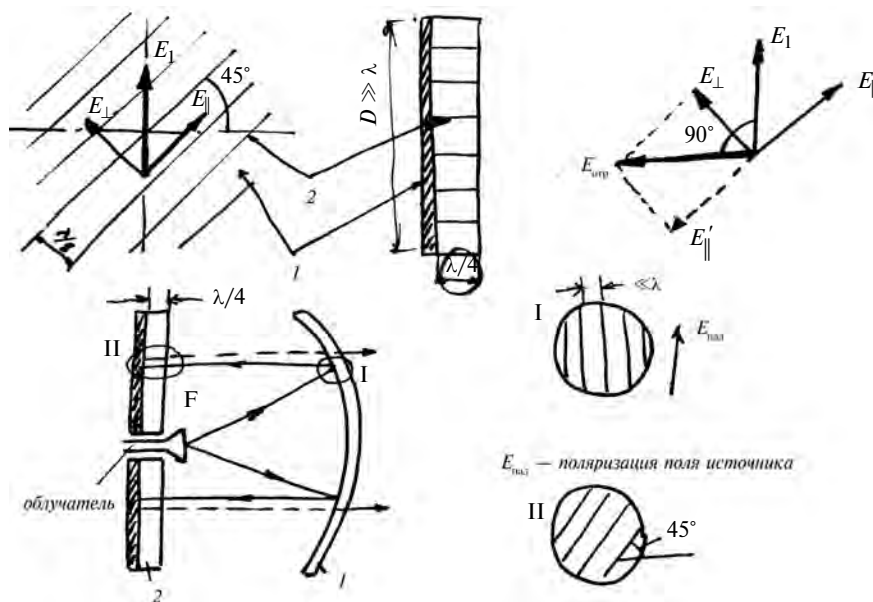


Рис. 89

является полное отсутствие сложнейшего волноводного тракта, необходимого для разводки электромагнитной энергии от передатчика (приемника) к каждому элементу ФАР (рис. 92).

Элементами решетки могут быть любые простые антенны, такие как вибраторы, спирали или волноводы с открытыми концами. В фидерную линию каждого излучателя могут включаться как фазовращатели, так и аттенюаторы, как это показано на рис. 92. Фаза и амплитуда переизлучаемого поля по отношению к фазе и амплитуде падающего поля зависят от параметров фидерных систем, подключенных к излучателям. Обычно применяется дискретное сканирование ДН и в качестве фазовращателей могут применяться передвижные короткозамыкатели — механические или "электрические". В последнем случае могут применяться СВЧ-диоды, которые размещаются в фидерных линиях через опреде-



Рис. 92

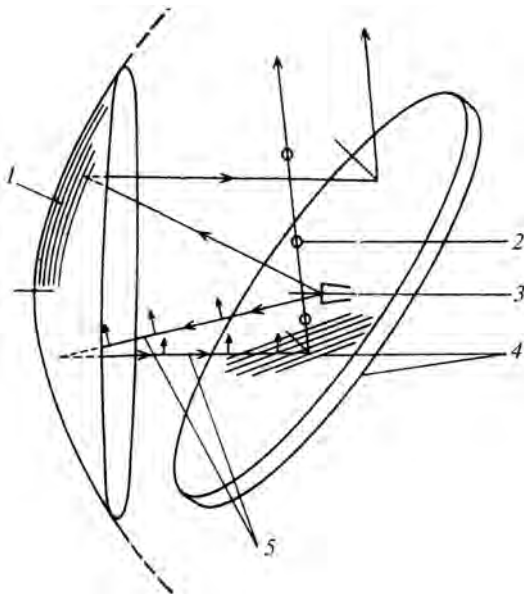


Рис. 90

1 — параболоид, выполненный из вертикально расположенных проводов; 2 — излучение с горизонтальной поляризацией; 3 — источник вертикально поляризованного излучения; 4 — система в виде решетки, обеспечивающей поворот поляризации и плоского рефлектора

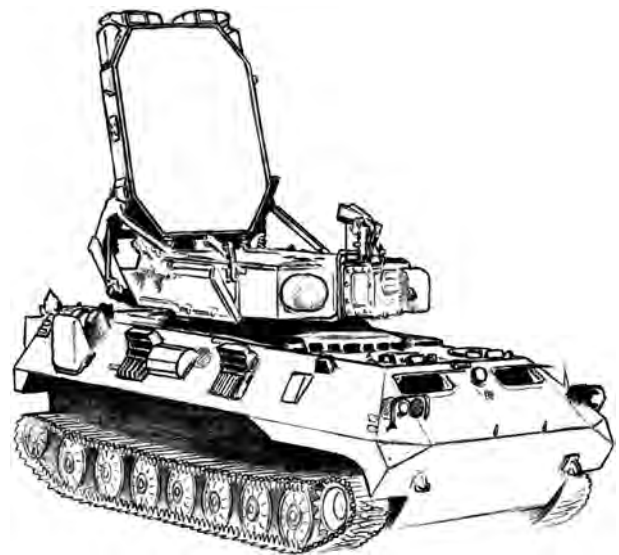


Рис. 92, а

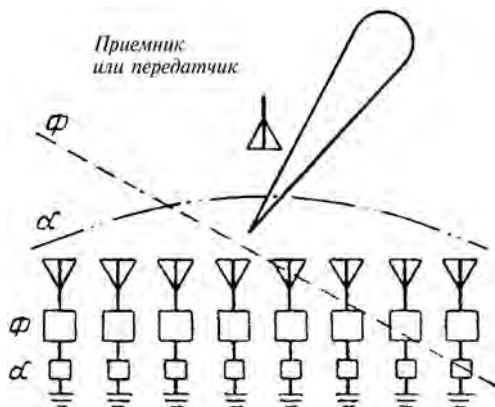


Рис. 91



Рис. 92, в

ленные интервалы, а закорачивание соответствующих диодов осуществляется подачей смещения на диод.

Одно из преимуществ концепции отражающей решетки состоит в том, что эта антенна может быть приспособлена к сложной поверхности. Например, бортовая отражающая решетка может быть расположена по поверхности спутника и облучаться единственным вынесенным облучателем.

Отражательные ФАР могут использоваться в составе двухзеркальной антенны с поворотом плоскости поляризации. На рис. 93 линейнополяризованное поле, создаваемое облучающим рупором, попадает на параболоид, отражается от его сетчатой поверхности и падает на плоскую ФАР, выполненную идентично плоской ФАР в схеме рис. 91, но отличающуюся тем, что в каждом элементе решетки, кроме фазовращателей, имеется устройство для поворота плоскости поляризации поля на  $90^\circ$ , благодаря чему поток энергии, идущий от ФАР, проходит через сетчатый параболоид.

Продолжая обсуждение модифицированных зеркал, нельзя оставить без внимания зеркальные антенны со специальной формой отражающей поверхности.

Для радиолокации часто требуются антенны, имеющие узкую ДН в одной плоскости и широкую — в ортогональной плоскости. Причем ДН должна удовлетворять некоторым специальным требованиям в заданном угловом секторе. Для получения такой ДН применяется профилирование зеркала в соответствующей плоскости.



Рис. 93

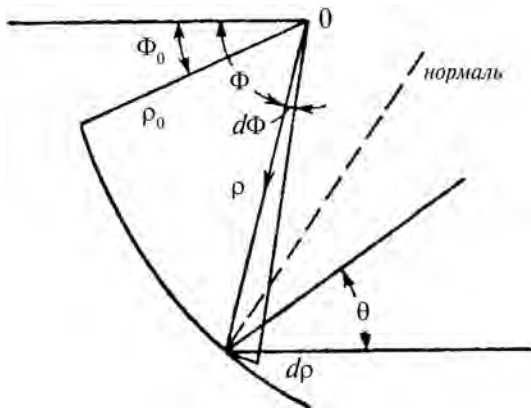


Рис. 94

Зеркало с заданной кривизной в одной плоскости может быть выполнено в виде цилиндра, у которого поперечное сечение вместо параболического имеет некоторую другую форму. Процедура соответствующего расчета состоит в следующем (рис. 94). Пусть облучатель, расположенный в  $(.)$   $O$  в пространстве между облучателем и рефлектором, имеет ДН  $J(\Phi)$ . Требуемая ДН в дальней зоне рефлектора характеризуется функцией  $G(\theta)$ . Если предположить, что мощности в обеих диаграммах одинаковы, то можно записать

$$\int_{\Phi_1}^{\Phi_2} J(\Phi) d\Phi = C \int_{\theta_1}^{\theta_2} G(\theta) d\theta,$$

где  $C = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} J(\Phi) d\Phi / \int_{\theta_1}^{\theta_2} G(\theta) d\theta$ ,  $\Phi_1, \Phi_2$  — угловые границы зеркала,  $\theta_1, \theta_2$  — угловые границы ДН в дальней зоне. В обычном случае данное уравнение можно решить графическим интегрированием. Графически оба интеграла вычеркиваются как функции углов  $\Phi$  и  $\theta$  (рис. 95) и дают возможность установить зависимость  $\theta = f(\Phi)$ . Для реализации необходимой формы зеркала нужно найти зависимость радиус-вектора поверхности  $\rho$  от угла  $\Phi$ . Соответствующее дифференциальное уравнение имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\rho} = d\Phi \operatorname{tg} \frac{1}{2} (\Phi - \theta).$$

После интегрирования получаем уравнение кривой зеркала в виде

$$\ln(\rho/\rho_0) = \int_{\Phi_0}^{\Phi} \operatorname{tg} \frac{1}{2} [\Phi - f(\Phi)] d\Phi,$$

где  $\rho_0$  — произвольная постоянная, определяющая конструктивные размеры зеркала в плоскости угла  $\Phi$ . В перпендикулярной плоскости размер зеркала не лимитирован и его влияние на ДН не учитывается.

Для зеркала с двойной кривизной, которое должно формировать ДН заданной формы в одной плоскости, а в перпендикулярной плоскости только фокусировать лучи, задача решается методом последовательных приближений. Как и в предыдущем случае можно получить расчетные уравнения

$$\ln(\rho/\rho_0) = \int_{\Phi_0}^{\Phi} \operatorname{tg} \frac{1}{2} (\Phi - \theta) d\Phi,$$

$$\frac{\int_{\Phi_1}^{\Phi_2} [J(\Phi)/\rho] d\Phi}{\int_{\Phi_1}^{\Phi_2} [J(\theta)/\rho] d\Phi} = \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} G(\Phi) d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} G(\theta) d\theta},$$



где  $\rho(\Phi)$  — уравнение кривой центрального сечения. Чтобы выполнить интегрирование, необходимо сделать начальные допущения относительно кривой центрального сечения. В нулевом приближении эту кривую можно считать параболой для участка, соответствующего основному лепестку ДН, окружностью для перпендикулярного сечения и прямой линией для формирующей части зеркала — его центрального сечения. Однако в большинстве применений, особенно если формирование ДН производится в малом угловом секторе, кривую можно считать параболой для всего раскрытия в вертикальной плоскости. После того как кривая центрального сечения вычислена, нужно определить профиль поперечного сечения. Чтобы сфокусировать энергию в азимутальной плоскости, зеркало должно состоять из серии парабол, которые могут иметь разные фокусные расстояния и располагаются так, что плоскость параболы, соответствующей конкретному  $\rho(\Phi)$ , оказывается наклоненной на определенный угол, поскольку  $\theta = f(\Phi)$ . Уравнение таких парабол, наклоненных на угол  $\theta$ , имеет вид

$$x_2 = 4z' \left[ \rho \cos^2 \frac{\theta + \Phi}{2} \right],$$

где  $x$  — расстояние в поперечном сечении, а  $z'$  — глубина параболы, измеренная от вершины вдоль фокальной линии.

Рассмотрим еще один метод расчета цилиндрической антенны, формирующей ДН заданной формы в поперечном сечении цилиндра. На рис. 95, а, показана расчетная схема. Пусть необходимо сформировать ДН в дальней зоне  $P(\theta)$ . Диаграмма направленности облучателя (например, рупора) задана функцией  $J(\Psi)$ . Требу-

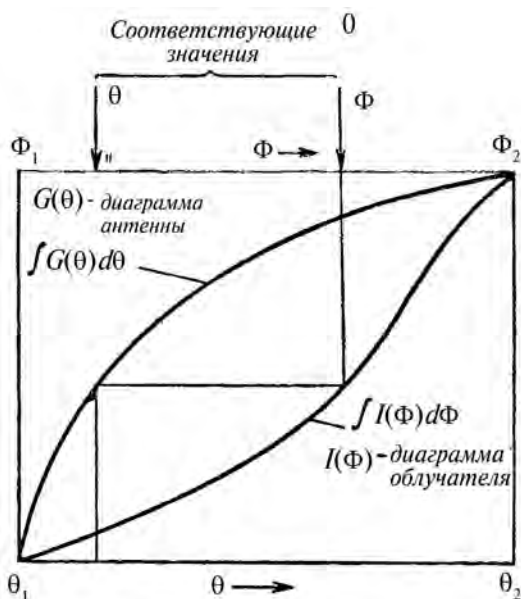


Рис. 95

ется определить уравнение профиля зеркала, преобразующего  $J(\Psi)$  в  $P(\theta)$ .

Рассмотрим два луча, падающие на зеркало из фокуса  $F$  под углами  $\Psi$  и  $\Psi + d\Psi$ , где  $d\Psi$  — бесконечно малое приращение угла. Этим двум лучам могут быть поставлены в соответствие два луча, отраженных от зеркала и распространяющиеся под углами  $\theta$  и  $\theta + d\theta$  по отношению к оси  $OF$ . Учитывая, что в точках отражения углы наклона падающих лучей по отношению к нормали и поверхности равны углам наклона отраженных лучей, рассмотрим связь между углами  $\theta$  и  $\Psi$  и текущим радиус-вектором профиля зеркала  $\rho(\Psi)$ . Из треугольника  $CDE$  следует

$$\operatorname{tg} \beta = DE/CD,$$

где  $\beta$  = углу  $DCE$ .

Угол  $DCE$  равен углу  $C''CC'$  как углы со взаимно перпендикулярными сторонами ( $DC \perp CE$ ,  $EC \perp CC''$ ). В то же время  $\beta = \angle C'CC'' = \frac{\angle FCC'}{2}$ , поскольку угол падения равен углу отражения.

Приняв за положительное направление при отсчете углов направление по часовой стрелке,

найдем  $\beta = \frac{\angle FCC'}{2} = \frac{\theta - \Psi}{2}$ . Учитывая, что

$DE = d\rho$ , а  $CD = \rho d\Psi$ , получим

$$\frac{d\rho}{\rho d\Psi} = \operatorname{tg} \frac{\theta - \Psi}{2}.$$

Углы  $\theta$  и  $\Psi$  связаны между собой, поскольку заданы  $J(\Psi)$  и  $P(\theta)$ . Найдем связь между  $\theta$  и  $\Psi$ , при которой  $J(\Psi)$  преобразуется в заданную диаграмму  $P(\theta)$ . Рассмотрим пучок лучей, идущих в пределах  $d\Psi$ . Ему соответствует пучок лучей, отраженных от зеркала в пределах  $d\theta$ . Для того,

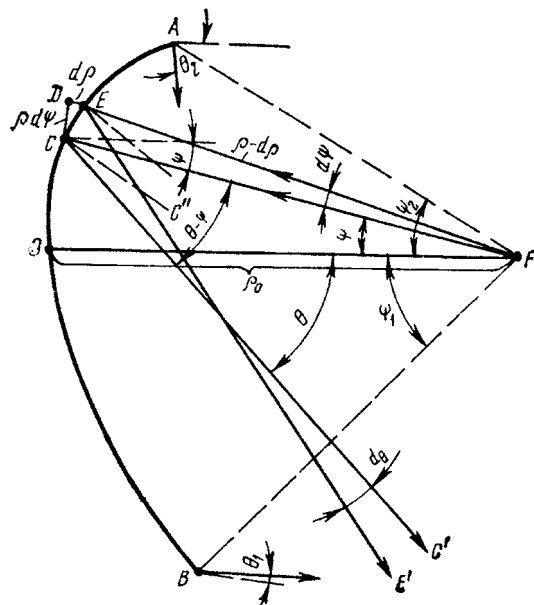


Рис. 95, а

чтобы при отражении от зеркала соблюдалось условие энергетического баланса, необходимо равенство потоков мощностей падающей на зеркало в пределах угла  $d\Psi$  и отраженной от него в пределах  $d\theta$ . Это условие баланса через заданные функции  $J(\Psi)$  и  $P(\theta)$  может быть записано в виде  $J(\Psi)d\Psi = kP(\theta)d\theta$ . Коэффициент  $k$  в этой формуле определяет взаимную нормировку функций  $J(\Psi)$  и  $P(\theta)$  и может быть определен из условия, что полная мощность, поступающая от облучателя на зеркало в пределах угла  $\Psi_2 - \Psi_1$ , должна быть равна мощности, отраженной от зеркала в пределах угла  $\theta_1 - \theta_2$ . Это приводит к соотношению

$$k = \frac{\int_{-\Psi_1}^{\Psi_2} J(\Psi)d\Psi}{\int_{\theta_1}^{-\theta_2} P(\theta)d\theta}.$$

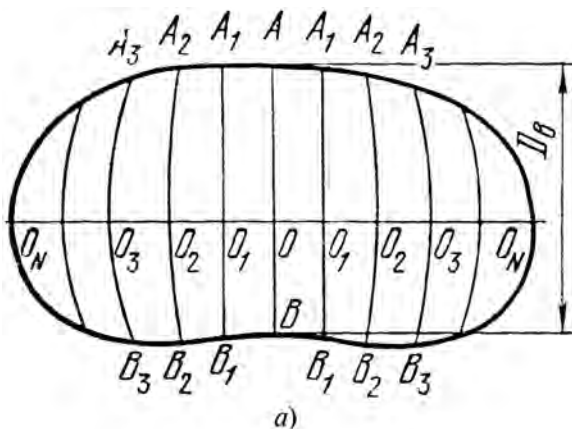
Аналогичное соотношение должно соблюдаться в пределах любого другого текущего диапазона углов  $\Psi - \Psi_1$  и  $\theta - \theta_2$ , где  $\Psi$  и  $\theta$  — текущие углы. Таким образом должно выполняться соотношение

$$\frac{1}{k} \int_{-\Psi_1}^{\Psi} J(\Psi)d\Psi = \int_{\theta_1}^{-\theta} P(\theta)d\theta.$$

Это равенство дает в интегральной форме искоемую связь между углами  $\theta$  и  $\Psi$  через заданные функции  $P(\theta)$  и  $J(\Psi)$ . Если, как это обычно бывает, функции  $J(\Psi)$ ,  $P(\theta)$  заданы графически, зависимость  $\theta(\Psi)$  может быть найдена путем численного интегрирования левой и правой частей этого уравнения. По найденной зависимости  $\theta(\Psi)$ , интегрируя уравнение  $d\rho/\rho d\Psi = \text{tg}[(\theta - \Psi)/2]$ , получим

$$\rho = \rho_0 e^{\int_{\Psi_0}^{\Psi} \text{tg} \frac{\theta(\Psi) - \Psi}{2} d\Psi}.$$

Для построения зеркала с ДН вида  $\text{cosec}^2\theta$  необходимо задаться граничными углами  $\theta_1$  и  $\theta_2$ .



Выбор этих граничных углов определяется спецификой задач, решаемых антенной системой. Выбрав  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , получаем

$$k = \frac{\int_{-\Psi_1}^{\Psi_2} J(\Psi)d\Psi}{\text{ctg}\theta_2 - \text{ctg}\theta_1},$$

а также  $\text{ctg}\theta = \text{ctg}\theta_1 + \frac{1}{k} \int_{-\Psi_2}^{\Psi} J(\Psi)d\Psi$ .

Полагая, что диаграмма направленности облучателя  $J(\Psi) = \text{cos}^2\Psi$ , окончательно получаем:

$$\theta(\Psi) = \text{arcctg} \left[ \text{ctg}\theta_1 + \frac{1}{2k} (\Psi + \Psi_1) + \frac{1}{4k} (\sin 2\Psi + \sin 2\Psi_1) \right],$$

$$k = \frac{1}{2} \frac{\Psi_2 - \Psi_1 + \frac{1}{2} (\sin 2\Psi_2 + \sin 2\Psi_1)}{\text{ctg}\theta_2 - \text{ctg}\theta_1}.$$

Координаты точек поверхности с параболическим горизонтальным профилем (рис. 96, а) вычисляются последовательно для нескольких вертикальных сечений в левой части антенны  $A_1O_1B_1$ ,  $A_2O_2B_2$  и т. д. и симметричных им сечений в правой части. Для расчета профиля в каждом из этих сечений используется уравнение

$$\ln(\rho/\rho_0) = \int_{\Phi_1}^{\Phi} \text{tg} \frac{1}{2} [\Phi - f(\Phi)] d\Phi$$

с той лишь разницей, что вместо радиуса  $\rho_0$  соответственно берутся расстояния  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  ... и т. д. (рис. 96, б), а в качестве функции  $J(\Psi)$  принимается диаграмма направленности облучателя в плоскостях, содержащих точки  $A_1O_1B_1F$ ,  $A_2O_2B_2F$  и т. д. На рис. 96, а, б вертикальный и горизонтальный размеры раскрыва обозначены соответственно  $D_B$  и  $D_r$ . В результате расчета по-

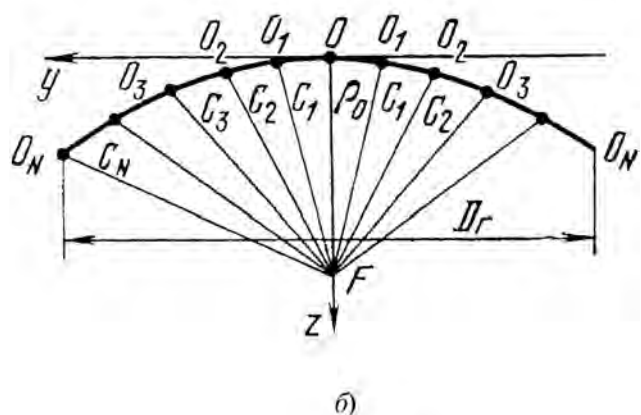


Рис. 96

лучаем антенну, условно изображенную на рис. 97, а реальный радиотелескоп показан на рис. 98.

Ради справедливости следует отметить, что график функции  $\cos^2\theta$  имеет вид как на рис. 99, а, а реальная ДН в лучшем случае может быть получена в виде кривой на рис. 99, б.

Каково предназначение зеркал двойной кривизны на практике? Для радиолокаторов поиска и пеленгации целей как на земле, так и на летательных аппаратах обычно требуется, чтобы антенна имела узкую ДН в азимутальной плоскости и широкую в угломестной плоскости. ДН в угломестной плоскости должна обеспечить обзор целей, расположенных до определенной высоты и в пределах угла места на всех рабочих дальностях системы. При этом главная задача наземной станции состоит в том, чтобы поддерживать неизменную величину поля, облучающего цель на данной высоте, независимо от ее угла места. В случае бортовых станций главная задача состоит в том, чтобы равномерно облучать поверхность земли тоже независимо от угла места точки на Земле. Чтобы удовлетворить этим требованиям, ДН в плоскости угла места должно иметь определенную форму. Так как при заданной высоте над землей дальность до цели от наземной РЛС пропорциональна  $\cos\theta$  ( $\theta$  — угол места), излучаемая мощность в плоскости угла места должна быть пропорциональна  $\cos^2\theta$ . То же самое касается и бортовых обзорных РЛС. Нельзя не отметить, что антенны с ДН типа  $\cos^2\theta$  распространены в мире чрезвычайно широко как в составе гражданских, так и в военных РЛС. Например, все достаточно серьезные аэродромы оснащены такими РЛС.

Мы рассмотрели метод реализации косекансной ДН путем соответствующего профилирования зеркала с одиночным облучателем. Между тем, такую ДН можно сформировать методом парциальных диаграмм с помощью ряда облучателей. В этом случае используется параболоид, облучаемый в вертикальной плоскости решеткой специально сфазированных облучателей. Каждый элемент решетки вместе с параболическим зеркалом дает свою (парциальную) диаграмму. В качестве облучателей используются вибраторы, щели или рупора в зависимости от длины рабочей волны (рис. 100, а).

Применяются два способа расположения элементов, при которых: а) главные лепестки всех парциальных диаграмм синфазны; б) поля в главных лепестках соседних парциальных диаграмм сдвинуты по фазе на  $\pi/2$ . В первом случае главные лепестки парциальных диаграмм должны пересекаться на уровне примерно  $0,5E$ , во втором — на уровне примерно  $0,7E$ . Парциальные диаграммы будут синфазны, если волны, излучаемые отдельными излучателями, достигают зеркала в фазе (рис. 100). В этом случае расстоя-

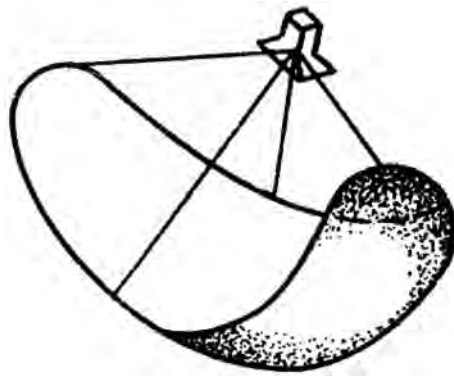


Рис. 97



Рис. 98

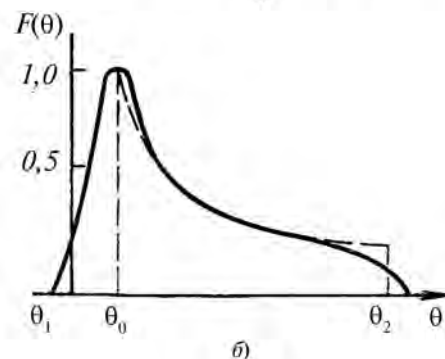
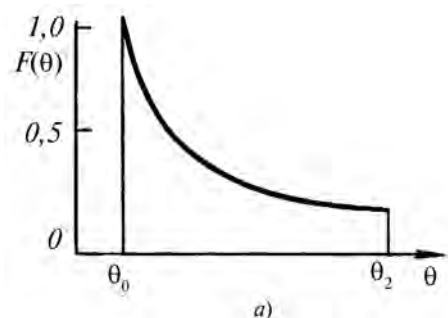


Рис. 99

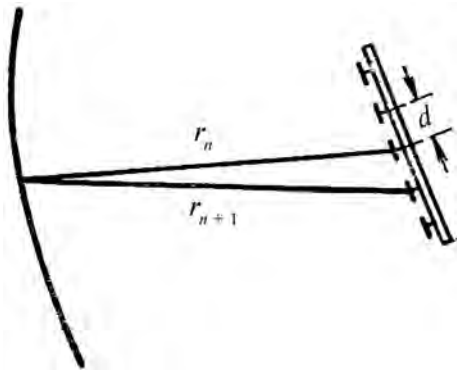


Рис. 100



Рис. 100, а

ние между излучателями  $d$  определяется с помощью соотношения

$$\frac{2\pi}{\lambda_b} d + \frac{2\pi}{\lambda} r_n - \frac{2\pi}{\lambda} r_{n+1} = 2\pi n - \varphi_0,$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\varphi_0$  — дополнительный сдвиг фазы возбуждения смежных излучателей, смысл  $r_n$  и  $r_{n+1}$ , ясен из рис. 100. Для случая, когда поля соседних парциальных диаграмм складываются в квадратуре,

$$\frac{2\pi d}{\lambda_b} + \frac{2\pi r_n}{\lambda} - \frac{2\pi r_{n+1}}{\lambda} = \frac{\pi}{2} (2n + 1) - \varphi_0.$$

Ниже приводится описание некоторых типов облучателей антенны с косекансной диаграммой направленности.

**а) Облучатель в виде линейной решетки вибраторов.** Решетка вибраторов обычно возбуждается бегущей волной, режим которой в волноводе обеспечивается оконечной поглощающей нагрузкой или, что более желательно, соответствующей настройкой последнего вибратора решетки. Во втором случае последний вибратор решетки должен обладать таким эквивалентным сопротивлением, которое "отсасывало" бы всю дошедшую до него по фидеру энергию. Это дос-

тигается подбором глубины погружения в волновод зонда, возбуждающего вибратор, или выбором расстояния от зонда до закорачивающего волновод поршня. Глубина погружения зондов, следующих друг за другом вибраторов, выбирается так, чтобы каждый вибратор извлекал из волновода долю мощности, необходимую для обеспечения требуемой диаграммы направленности.

Путем поворота соседних вибраторов на  $180^\circ$  достигается дополнительное изменение фазы возбуждения также на  $180^\circ$ .

Достоинство вибраторной решетки заключается в простоте ее конструкции. Недостатком ее является взаимозависимость положения и фазы каждого элемента при настройке, а также трудность регулировки ширины диаграммы направленности.

**б) Облучатель в виде линейной решетки щелей.**

В этой системе необходимое распределение мощности между излучателями достигается путем поперечного смещения щелей по широкой стенке волновода. Дополнительный фазовый сдвиг  $\varphi_0$  получается при расположении щелей в "шахматном порядке" относительно оси волновода.

Недостатком этого типа облучателя является малая пропускаемая мощность.

**в) Облучатель в виде линейной решетки рупоров.**

Необходимые фазовые соотношения достигаются подбором длины волноводов, питающих отдельные рупоры. Возможны, например, две схемы распределения энергии между рупорами. В первой схеме мощность распределяется между рупорами с помощью перегородок, помещенных перпендикулярно вектору  $E$  внутри питающего волновода. На схеме рупоры подсоединяются к главному волноводу с помощью Т-ответвлений, а распределение энергии между рупорами производится при помощи диафрагм, устанавливаемых в ответвлениях и в основном волноводе.

Особенностью метода парциальных диаграмм является возможность возбуждения отдельных элементов решетки от разных передатчиков, работающих на разных частотах. Это дает возможность излучать большую мощность и производить частотную развязку каналов.

Проектирование антенны с парциальным методом образования косекансной диаграммы направленности проводится методом последовательных приближений. Можно рекомендовать следующий порядок расчета.

1. По заданной ширине диаграммы направленности в азимутальной плоскости ( $2\varphi_{0,5P}$ ) определяем горизонтальный размер раскрыва:

$$D_r = \frac{(60 - 70)\lambda}{2\varphi_{0,5P}}.$$

2. Определяем вертикальный размер раскры- ва усеченного параболоида, исходя из требуе- мой ширины диаграммы направленности в этой плоскости.

3. Для заданных пределов углов  $\theta_1$ — $\theta_2$  рас- считываем косекансную диаграмму направлен- ности и строим ее график. Эти пределы опреде- ляются необходимой дальностью действия РЛС.

4. Определяем приближенно ширину перво- го луча в вертикальной плоскости (для облуча- теля, находящегося в фокусе):

$$2\theta_{0,5P} = \frac{(60 - 70)\lambda}{D_B}$$

5. Определяем количество парциальных диа- грамм, их расположение в пределах углов  $\theta_1$ — $\theta_2$  и величину смещения  $\Delta x$  для каждого элемента облучателя.

6. Определяем соотношение мощностей об- лучателей:

$$\frac{P_N}{P_0} = \frac{\operatorname{cosec}^2 \theta_N}{\operatorname{cosec}^2 \theta_0},$$

где  $\theta_N$  — направление максимумов парциальных лепестков,  $\theta_0$  — направление первого максиму- ма косекансной диаграммы направленности (рис. 99, а).

7. Исходя из заданной излучаемой мощности и длины волны, выбираем тип отдельного облу- чателя. При большой величине излучаемой мощ- ности целесообразно применение рупорных об- лучателей.

8. Рассчитываем первую парциальную диа- грамму (для облучателя, помещенного в фокусе), уточняем значение ее ширины и находим рас- ширение последующих парциальных диаграмм.

9. Производим суммирование парциальных диаграмм с учетом фазы полей. При этом пола- гаем, что поле в данном направлении определя- ется как сумма двух прилегающих к этому на- правлению диаграмм. Если общая диаграмма направленности получается сильно изрезанной, то производится корректировка положения об- лучателей и расчет повторяется до тех пор, пока получаемая диаграмма направленности не будет близка к требуемой.

10. Рассчитываем диаграмму направленности в азимутальной плоскости для облучателя, нахо- дящегося в фокусе, и находим расширение диа- граммы для смещенных из фокуса облучателей.

Во многих случаях простые геометрические поверхности зеркал не дают возможности ре- шать те или иные задачи, связанные с конкрет- ным применением антенн, особенно задачи ска- нирования в широком угловом секторе. Чтобы сделать такие зеркала более эффективными, их надо модифицировать. В частности, их можно покрыть диэлектрическим материалом, образу-

ющим линзу. Наиболее простые решения можно получить с помощью, так называемой, линзы Мэнжина в сферическом зеркале, на которое нанесен слой диэлектрика. В этом случае одна поверхность линзы совпадает с поверхностью зеркала, а вторая ее поверхность тоже сфериче- ская, но другого радиуса и с другим центром. Надлежащим выбором местоположения облу- чателя, радиуса и положения центра второй по- верхности линзы удастся получить сканирова- ние в достаточно широком секторе углов.

Антенна типа "песочные часы" также может быть использована для санирования косеканс- ной ДН в горизонтальной плоскости в широком секторе углов (вплоть до  $360^\circ$ ). Такая антенна схематически показана на рис. 101. Профиль рефлектора 1 обеспечивает формирование ДН в вертикальной плоскости; весь рефлектор обра- зован вращением кривой 1 вокруг вертикальной оси ОО. Облучатели 2 образуют кольцевую ре- шетку, расположенную вдоль фокальной линии рефлектора. Фазировка и коммутация элемен- тов этой решетки производится с учетом необхо- димой ширины ДН в горизонтальной плоскости.

Была также предложена конструкция на базе линзы из отрезков волноводов. На рис. 102 по- казано эллиптическое зеркало с волноводной корректирующей линзой, вплотную примыкаю- щей к поверхности зеркала и имеющую вторую поверхность в виде сферы с центром в точке

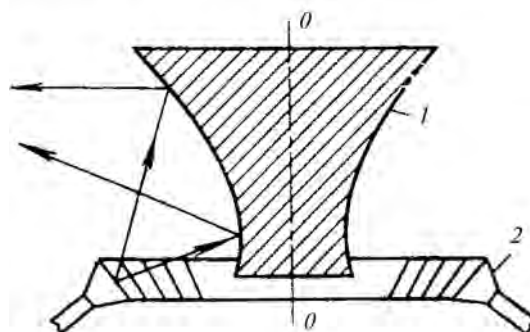


Рис. 101

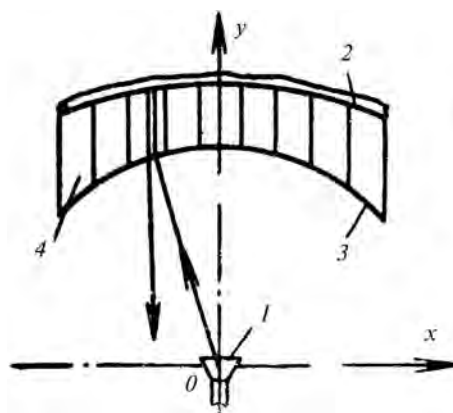


Рис. 102

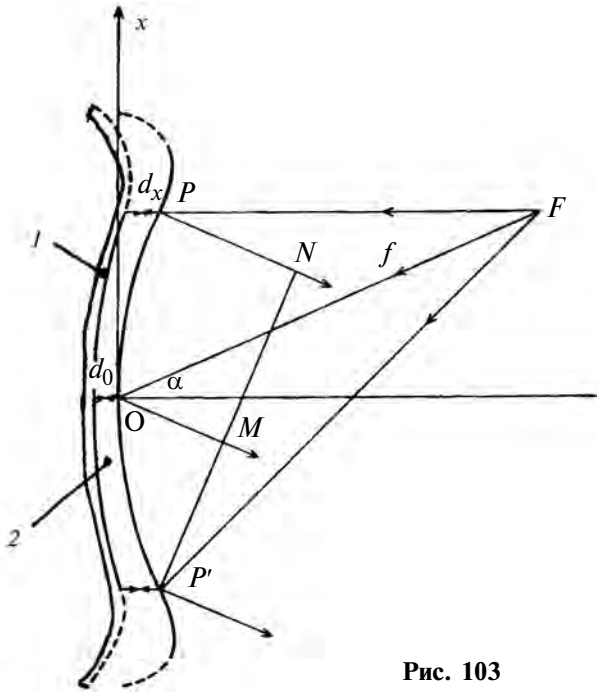


Рис. 103

расположения облучателя. Уравнение эллиптической поверхности имеет вид

$$\frac{(2nx-1)^2}{(2n-1)^2} + y^2 = 1,$$

где  $n = \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}$ ,  $a$  — ширина стенки волновода, которая перпендикулярна вектору  $E$  поля облучателя. При этом выборе параметров антенны фронт отраженной волны оказывается плоским. В то же время падающие из облучателя и выходящие из антенны лучи пересекаются по поверхности сферы, вследствие чего выполняется условие синусов Аббе, и антенна может применяться как сканирующая.

Возможна еще одна, более сложная, конструкция модифицированного зеркала с диэлектрическим слоем, схема которого представлена на рис. 103. Здесь 1 — профиль зеркала, 2 — слой диэлектрика,  $F$  — положение облучателя для выбранного угла сканирования. Для расчета формы зеркала и толщины диэлектрического слоя с коэффициентом преломления  $n$  в [4] выбран так называемый метод 3-х лучей, показанных на рис. 103. Для выбранного направления лучей  $\alpha$ , необходимо предположить выполнение равенства оптических путей от фокуса  $F$  до точек  $P'$ ,  $M$  и  $N$ . То есть должно выполняться следующее условие

$$\begin{aligned} FP + 2nd(x) + PN &= \\ &= FO + 2nd_0 + OM = FP' + 2nd(x). \end{aligned}$$

Отсюда следует, что  $FP + PN = FP'$ . Уравнение для определения текущей толщины диэлектрического слоя принимает вид

$$2n[d(x) - d_0] = Z \cos \alpha = f \cos^2 \alpha (1 - \cos \alpha).$$

Подробности расчетов различных вариантов зеркал с диэлектрическим слоем изложен весьма детально в [4].

Возможна конструкция плоского модифицированного зеркала, идея которого основана на понятии зон Френеля — французского физика, жившего на рубеже 18-го и 19-го веков, который ввел понятие зонирования волнового фронта. Зонированная антенна Френеля по принципу действия существенно отличается от рефлекторных антенн; она состоит из набора проводящих концентрических кольцевых полос, расположенных на одной плоскости. Кольца обычно изготавливаются путем травления фольгированного диэлектрика. Под действием падающей волны электромагнитного поля согласно принципу Гюйгенса каждое кольцо становится источником вторичного излучения. Ширина каждого кольца и расстояния между ними подбираются так, чтобы вторичные поля от средних линий каждого кольца в пространстве совпадали в определенной точке — в фокусе.

На рис. 104 представлено сечение и вид спереди зонированной антенны. Для синфазного сложения полей, создаваемых кольцами, необходимо, чтобы расстояния между средними линиями колец и фокусом отличались на длину волны сигнала. На рис. 105 показано сечение центрального диска и первого кольца. Если фокус

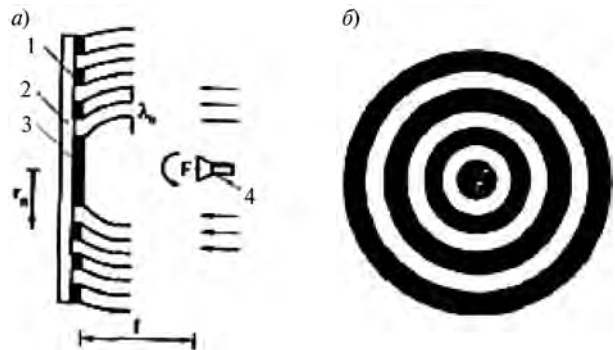
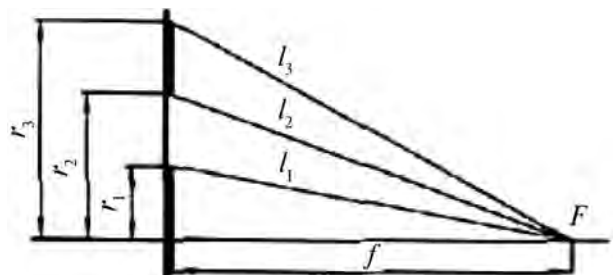


Рис. 104

**Схематическое изображение зональной антенны Френеля:**

$a$  — вид сбоку — разрез [1 — металлические кольца; 2 — диэлектрическое основание; 3 — центральный диск; 4 — конвертер];  $b$  — вид спереди [без конвертера]



Определение фокусного расстояния зональной антенны Френеля

Рис. 105

будет находиться на расстоянии  $f$  от плоскости кольца, то синфазность сигналов будет обеспечена при условии, если  $l_1 = f + \lambda/4$ ,  $l_2 = f + 3\lambda/4$ ,  $l_3 = 5\lambda/4$  и т. д., т. е. в общем случае если  $l_n = f + (2n - 1)\lambda/4$ , где  $n = 1, 2, 3$  и т. д. Отсюда можно найти радиус колец

$$r_n = \frac{1}{2} \sqrt{(2n-1)f\lambda} + \frac{1}{16} (2n-1)^2 \lambda^2.$$

Сигналы, излучаемые серединой колец, оказываются в фазе с сигналом, полученным центром диска. Расфазировка между сигналами, излученными кромкой диска и его центром, а также кромками колец и их серединой составляют  $1/4$  длины волны. Как показывает анализ, широкополосность такой антенны оказывается достаточной для ее использования в качестве приемной антенны спутникового ТВ.

Очевидно, что такая антенна будет однонаправленной, если к полотну, на котором вытравлены кольца, добавить сплошную плоскость на соответствующем расстоянии от зонированной поверхности.

При использовании зеркальных антенн, особенно в системах спутниковой связи, часто возникает необходимость работы в нескольких частотных диапазонах в одном и том же направлении, например, на связной спутник. Совмещение нескольких частотных диапазонов производится с помощью частотно-селективных поверхностей (ЧСП), которые обладают свойством пропускать или отражать электромагнитное поле в зависимости от частоты.

Так, реализация принципа совмещения ряда частот в одном направлении может быть реализована в системе лучевода зеркальной антенны (рис. 106). Здесь 1 — главное зеркало, 2 — вспомогательное зеркало, 3 — азимутальная ось вращения, 4 — угломерная ось, 5 — облучатель Ка-диапазона, 6 — облучатель X-диапазона, 7 — облучатель S-диапазона. Таким образом, в антенне совмещены 3 различных диапазона. Плоский отражатель  $\Pi_1$  позволяет совместить два диапазона — X и S, а плоский отражатель  $\Pi_2$  — все три диапазона.

Реализация ЧСП осуществляется путем создания системы отверстий в металлической поверхности различной формы — перфорированная поверхность. По-видимому, возможно бесчисленное множество типов отверстий и законов их расположения друг относительно друга. На рис. 107 и др. представлены только некоторые из них. Размеры отверстий и их взаимное расположение определяют коэффициенты прохождения и отражения в зависимости от частотного диапазона. Кроме отверстий в сплошной металлической поверхности могут использоваться металлические элементы, расположенные на одной из сторон диэлектрической подложки (рис. 108). Анализ такой структуры и конкретные результаты расчетов ЧСП, выполненной в виде решетки кресто-

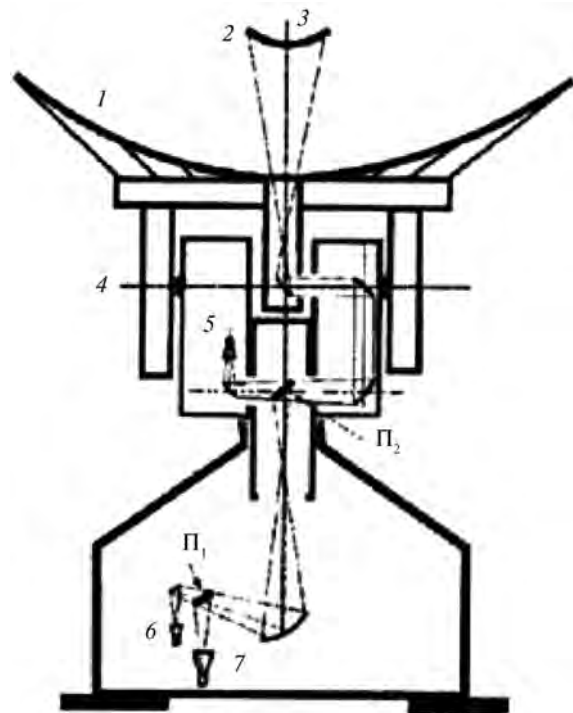


Рис. 106

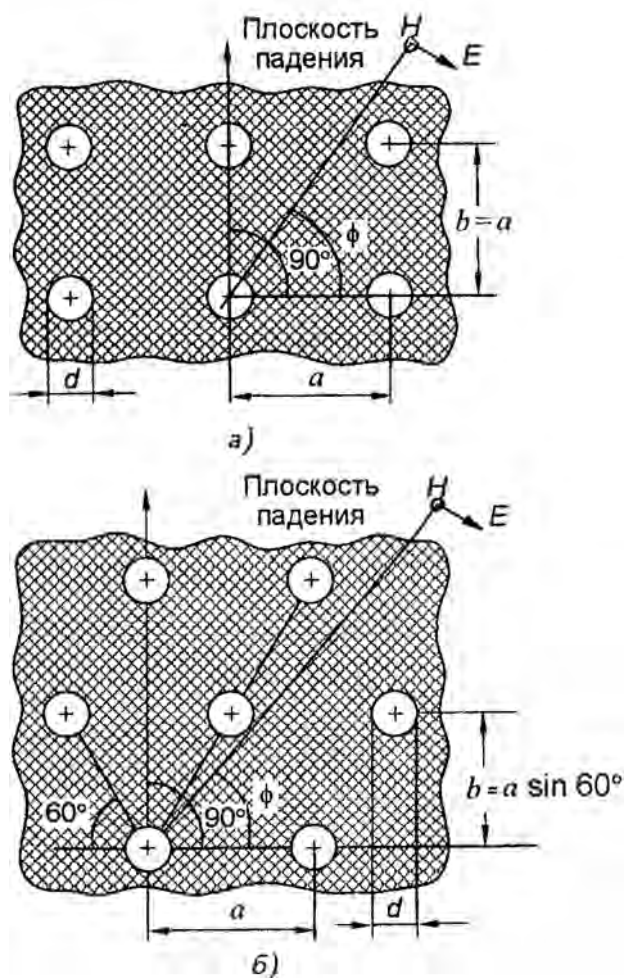


Рис. 107

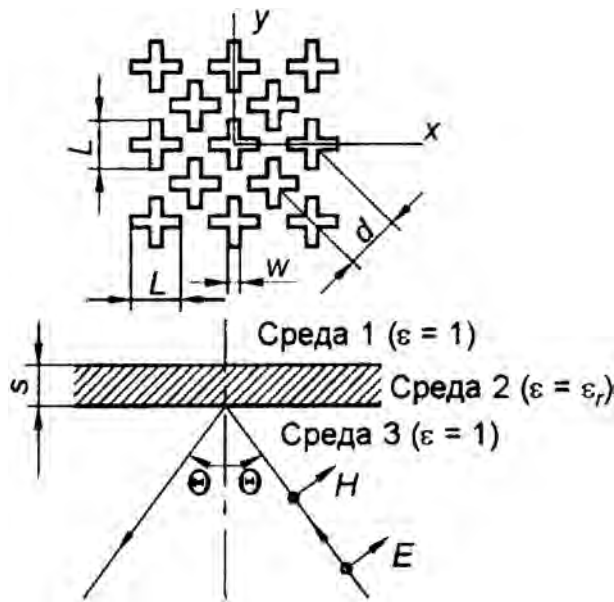


Рис. 108

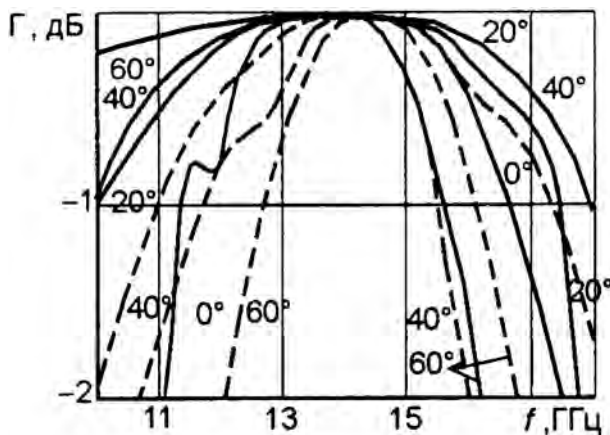


Рис. 109

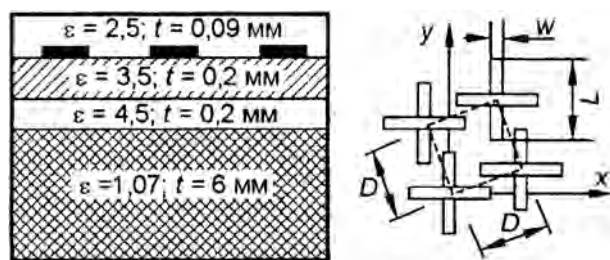


Рис. 110

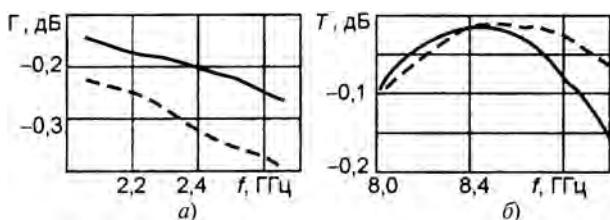


Рис. 111

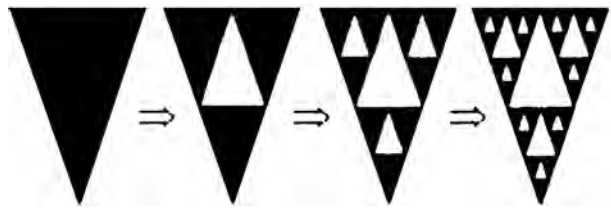


Рис. 112

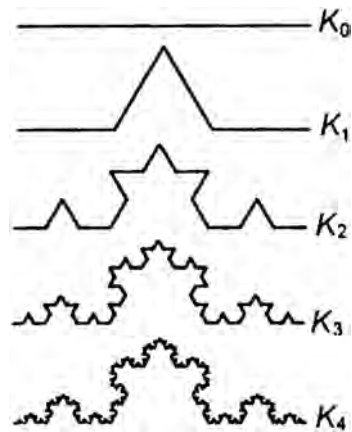


Рис. 113

образных элементов, для E и H-поляризации плоской волны (пунктирные и сплошные кривые соответственно) и для нескольких углов падения, значения которых приведены на графиках рис. 109, где  $\Gamma$  — коэффициент отражения, а на рис. 110 и 111 приведены результаты для аналогичных металлических элементов, но расположенных на многослойном диэлектрике, где  $T$  — коэффициент прохождения. ЧСП может быть построена в виде решетки из фрактальных элементов. Название "фрактал" происходит от латинского слова *fractus* — дробленный, сломанный, разбитый. Этот термин обозначает сложную геометрическую фигуру, обладающую свойством самоподобия.

Пример фрактала — треугольник Серпинского, предложенный им в 1915 году. На рис. 112 показан процесс построения этого треугольника. На рис. 113 показан процесс построения кривой Коха. Считается, что использование фрактальной геометрии при проектировании антенных устройств было впервые применено Н. Коэном, который жил в г. Бостоне, в котором была запрещена установка внешних антенн на здания. Н. Коэн вырезал из алюминиевой фольги фигуру в форме кривой Коха, наклеил на лист бумаги и присоединил к приемнику.

В настоящее время теория и техника фрактальных антенн интенсивно развивается в плане построения как широкополосных антенн, так и создания частотно-селективных и поляризационно-селективных антенн. В ряде случаев создание необходимых ЧСП возможно с использованием так называемого генетического алгоритма.



## ОТ ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ К ЗЕРКАЛЬНЫМ АНТЕННАМ

Двухзеркальные антенны в основе своей имеют схемы реальных оптических телескопов, использовавшихся для астрономических исследований. На рис. 114 показана схема простейшего телескопа — телескопа Ньютона. Здесь 1 — параболоид, 2 — плоскость. На рис. 115 представлена аналогичная схема Ломоносова тоже с параболическим зеркалом. Далее идут двухзеркальные телескопы. На рис. 116 телескоп Кассегрена с параболическим большим зеркалом (1) и гиперболическим малым (2). В схеме Грегори (рис. 117) большое зеркало (1) — параболоид, малое зеркало (2) — эллипсоид. Далее в порядке усложнения идет телескоп Нессмита (рис. 118); здесь 1 — параболоид, 2 — гиперболоид, 3 — плоскость. Первый реально действующий апланатический телескоп был разработан и рассчитан Кретьеном в 1920 г. и изготовлен в мастерской Ричи (рис. 119) и соответственно получивший название телескоп Ричи—Кретьена. Здесь 1 и 2 — гиперболические зеркала. На рис. 120 представлен телескоп Ричи—Кретьена тоже с гиперболическими зеркалами 1 и 2, но с дополнительным линзовым корректором 3. На рис. 121 представлена схема телескопа Максутова со сферическим (1) большим зеркалом и мениском 2 с посеребренной центральной частью. На рис. 122 система Шмидта: 1 — сфера, 2 — корректирующая пластинка, фотопластинка 3 должна быть изогнута. И, наконец, схема Мерсена (рис. 123), в которой оба зеркала имеют параболическую форму. Наиболее интересными представляется схема Ричи—Кретьена, т. к. эта схема обладает очень хорошими характеристиками, но иногда требует двухлинзового корректора, который исправляет астигматизм системы, характерный для пары гиперболических зеркал. Телескопы по

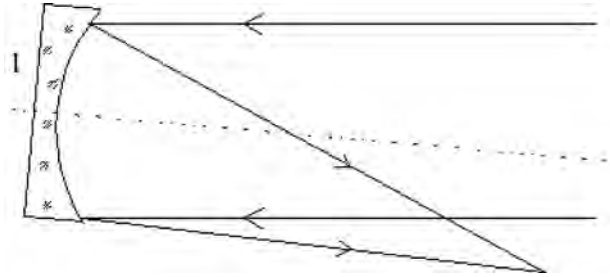


Рис. 114

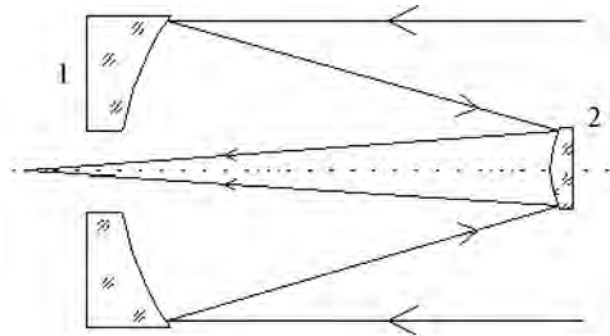


Рис. 116

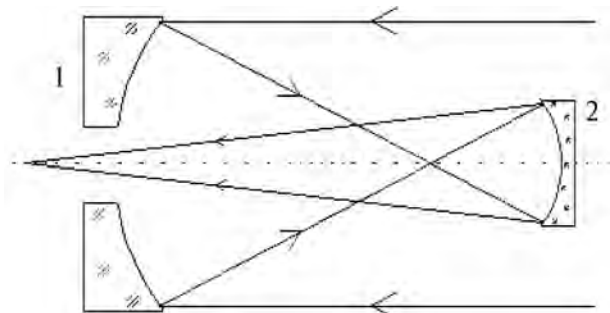


Рис. 117

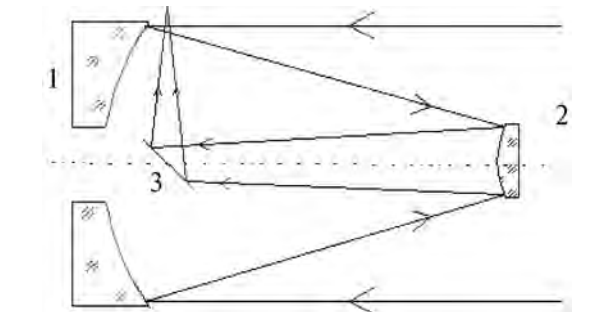


Рис. 118

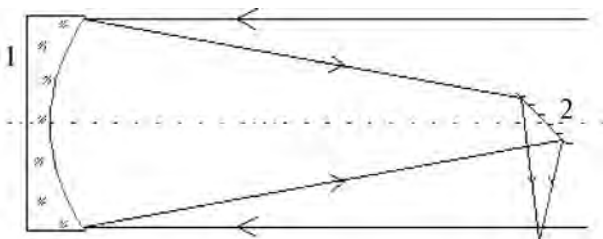


Рис. 114

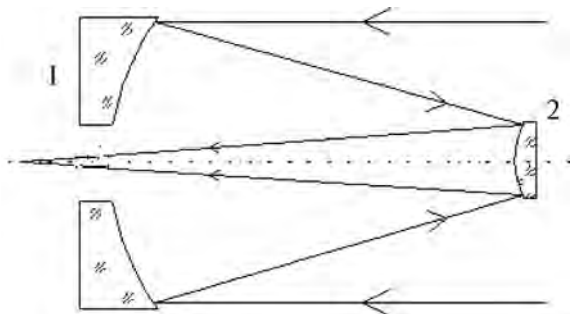


Рис. 119

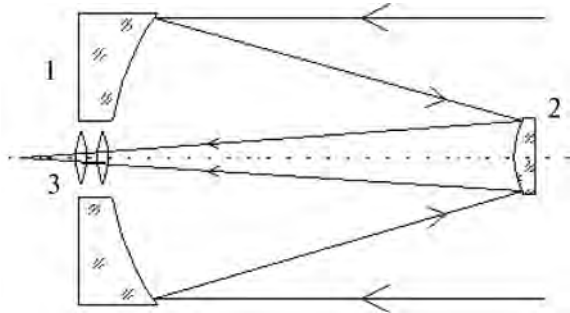


Рис. 120

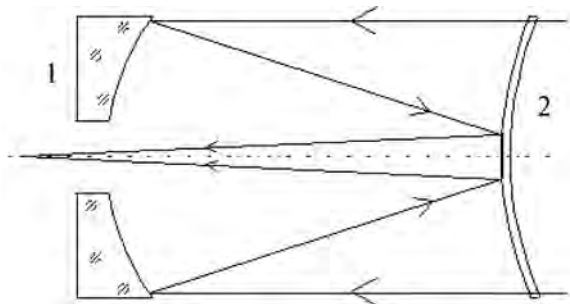


Рис. 121

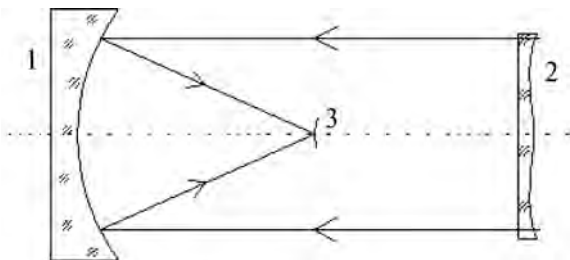


Рис. 122

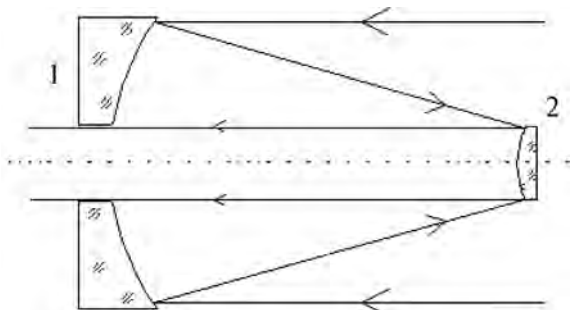


Рис. 123

схеме Ричи—Кретьена наиболее практичны и по этой схеме строятся большинство телескопов, в том числе и космические. Так, телескоп Ричи—Кретьена был установлен на ИСЗ "Астрон", который был запущен в 1983 году.

Схемы оптических телескопов оказались существенно дополненными в процессе развития техники зеркальных антенн различного назначения. Рассмотрим этот процесс на примере антенн, применяемых в радиорелейных линиях. Так, на рис. 124 приведена схема двухзеркальной антенны с облучением вспомогательного зеркала плоской волной. В качестве источника плоского фронта показана рупорно-параболическая антенна. В этом случае вспомогательное зеркало параболической формы конфокально параболоиду главного зеркала. На рис. 125 тот же плоский фронт облучает тоже параболоид, но повернутый на  $180^\circ$ .

На рис. 126 представлена антенна с эллиптическим вспомогательным зеркалом, а на рис. 127 — с плоским.

Определенным недостатком всех представленных выше двухзеркальных антенн является то, что вспомогательное зеркало затеняет раскрыв главного зеркала, что снижает эффективность антенны и происходит увеличение уровня боковых лепестков. Однако существует метод устранения этого нежелательного эффекта за счет построения антенн с кольцевым фокусом главного зеркала.

Рассмотрим рис. 128, а. Пусть парабола 1 имеет фокус в точке  $O_2$ , а ее рабочий участок располагается выше оси  $CC$ . С точкой  $O_2$  совмещен один из фокусов эллипса 3. Во втором фокусе  $O_1$  находится источник. В качестве отражателя вспо-

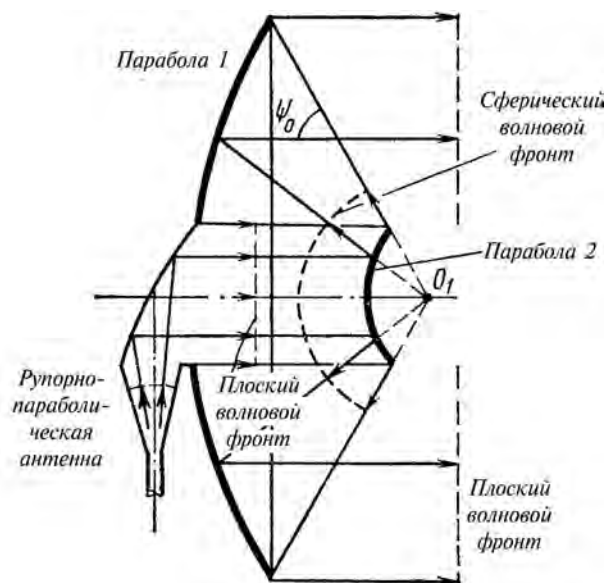


Рис. 124

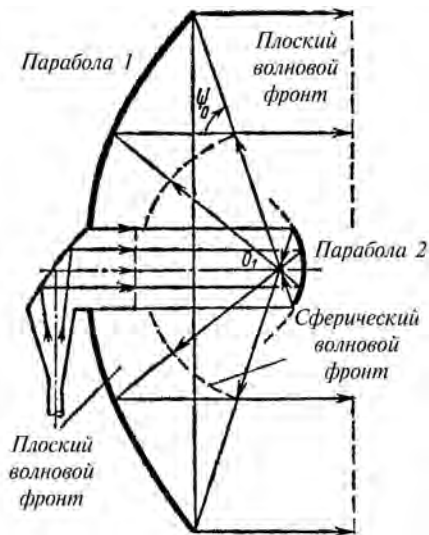


Рис. 125

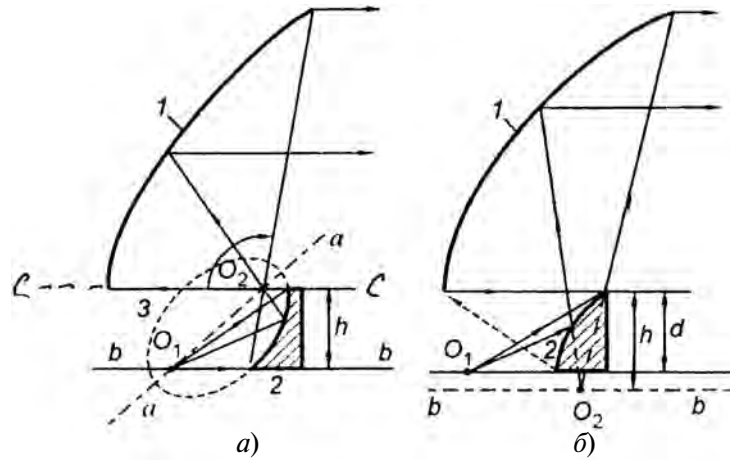


Рис. 128



Рис. 126

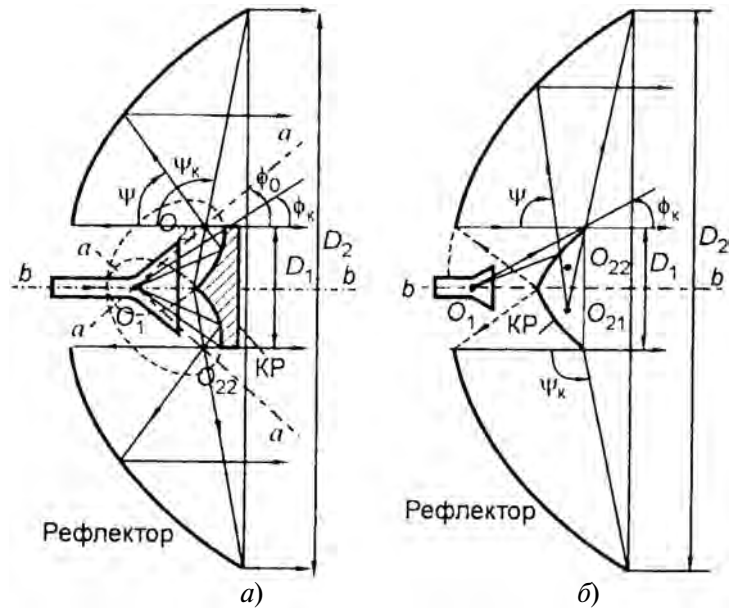


Рис. 129

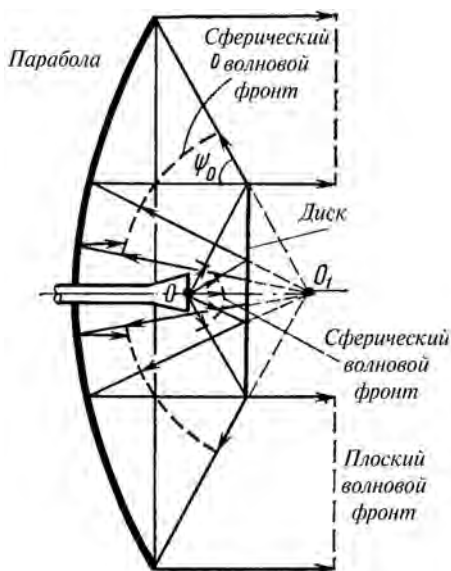


Рис. 127

могательного зеркала 2 выбирается такая его часть, что все вспомогательное зеркало оказывается ниже оси параболы  $CC$ , как это видно из приведенной схемы. Если теперь вращать параболу 1 и эллипс 3 вокруг горизонтальной оси  $BB$ , то они образуют две отражающие поверхности, причем точка  $O_1$  остается неподвижной, а точка  $O_2$  — фокус параболы и эллипса опишет окружность — геометрическое место фокусов. В итоге получается схема, приведенная на рис. 129, а. Такая антенна имеет условное название АДЭ — буква "Э" — от слова "эллипс". Аналогичная конструкция получается, если в качестве образующей вспомогательного зеркала использовать гиперболу (рис. 128, з и 129, б). Соответствующая антенна имеет название АДГ ("Г" от гиперболы). Наибольшее распространение в настоящее время получили антенны АДЭ в качестве антенн магистральных наземных радиорелейных линий.

## ЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ В СОВРЕМЕННЫХ РЛС

Есть такая отрасль радиолокации, которая чрезвычайно разнообразна и многочисленна и с которой, сами того не подозревая, ежедневно имеют дело миллионы людей — это авиапассажиры, которые в каждую секунду своего полета находятся в поле зрения и под управлением радиолокаторов. И если случится, не дай Бог, какая-то катастрофа, то следует сокрушительное сообщение — такой-то рейс пропал с экранов радаров — это один из современных признаков несчастья. С другой стороны, от эффективности и исправности этих самых радаров зависит сама жизнь миллионов авиапассажиров. Гигантские сверхскоростные гражданские и военные самолеты взлетают, летят и садятся исключительно с помощью радаров.

Управление полетом современных летательных аппаратов в районе аэропортов, независимо военных или гражданских, невозможно без использования специальных радиолокационных станций. Названные радиолокационные системы включают в свой состав радиолокаторы трассовые, аэродромные, посадочные, вторичные, метеонавигационные и станции обзора летного поля. Как это не покажется странным на первый взгляд, но практически все перечисленные радиолокаторы (российские) имеют в своем составе в настоящее время (2010 год) зеркальные антенны довольно ограниченного вида — однозеркальные антенны с ДН типа  $\text{cos}^2\theta$ . В подтверждение этого факта рассмотрим некоторые типичные аэродромные РЛС с учетом особенностей их работы.

Первые радиолокаторы, которые встречают самолеты на самых дальних подступах при подлете к аэродрому так и называются — первичные. Первичные обзорные радиолокаторы — двухкоординатные — они определяют дальность и азимут летательных аппаратов. Имеют узкую ДН в горизонтальной плоскости ( $1\div 2^\circ$ ) и косекансную ДН в вертикальной плоскости в секторе  $30\div 40^\circ$ . Вторичные локаторы служат еще для получения дополнительной информации; они имеют меньшую дальность и запускаются в действие от первичных локаторов.

Конструктивно первичные и вторичные обзорные локаторы объединяются общим приводом антенных систем для совместного вращения в горизонтальной плоскости.

Антенные системы большинства первичных локаторов по форме близки к усеченному пара-



Рис. 130

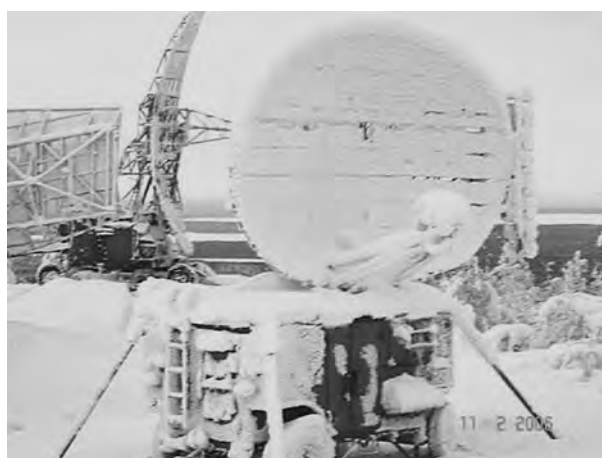


Рис. 131



Рис. 132

болоиду вращения и выполняются из металлической сетки для уменьшения ветровой нагрузки, поскольку это допускается тем, что локаторы работают на длине волны 10—23 см и даже волноводы для волноводной шелевой решетки выполняются из сетки, как это видно на рис. 130 (вот уж точно — чудо природы). Следует учесть, что аэродромы существуют во всех климатических зонах, и антенны должны исправно работать даже в таком состоянии, как показано на рис. 131, 132.

На отражателе первичного локатора иногда монтируют антенну вторичного локатора. Частота вращения трассовых локаторов составляет 6 об/мин и 12 об/мин в аэродромных системах, что обусловлено необходимостью более частого обновления информации о положении летательных аппаратов в аэродромной зоне.

Обычно антенны первичных радиолокаторов имеют два облучателя в вертикальной плоскости, один из которых обеспечивает обнаружение самолетов под малыми углами места, т. е. на максимальной дальности. Предусматривается возможность изменения поляризации, что позволяет ослабить сигналы, отраженные от метеообразований (рис. 133). Антенны вторичных радиолокаторов в общем случае должны формировать 3 луча: основной (или суммарный), подавления боковых лепестков по запросу и подавления боковых лепестков по ответу. Методы подавления боковых лепестков предназначены для устранения ложных сигналов, принимаемых от бортовых ответчиков по боковым лепесткам ДН основной антенны наземного радиолокатора, и используют сравнение амплитуд сигналов, поступающих по основному и дополнительному каналам радиолокатора (рис. 134 и рис. 135).

В качестве примера рассмотрим антенное устройство трассового радиолокатора "Скала" (рис. 136), имеющего первичный и вторичный радиоканалы. Первичный канал имеет двухлучевую ДН (рис. 137) в вертикальной плоскости для разделения зоны обзора на ближнюю и дальнюю. Зона обнаружения разделена на 4 участка. Дальность действия локатора — до 500 км. Антенна первичного канала — зеркального типа размером  $15 \times 10,5$  м; содержит два рупорных облучателя: нижний служит для формирования верхнего луча ДН, а верхний — для формирования нижнего луча. Форма ДН в вертикальной плоскости —  $\text{cosec}^2\theta$ . Включенные в фидерный такт поляризационные устройства позволяют плавно менять поляризацию излученного поля от линейной до круговой. Облучатели показаны на рис. 133. Антенна вторичного канала в виде линейной рупорной решетки может располагаться над рефлектором, и частично видна на рис. 133. На рис. 138 представлена антенна радиолокатора "Лири", а на рис. 139 и рис. 140 — радиолокатор АОРЛ-85.

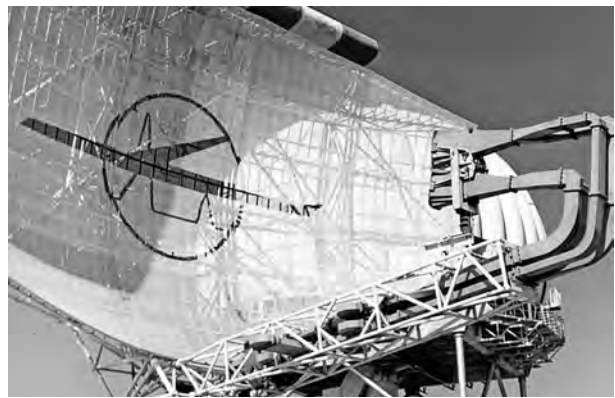


Рис. 133

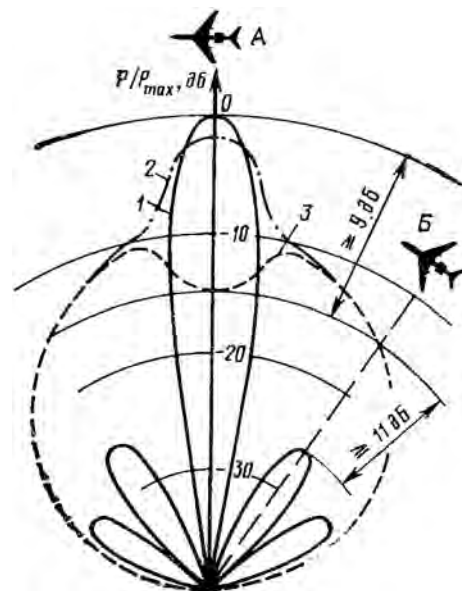


Рис. 134

Возможная форма диаграммы направленности основной антенны (1) и антенны подавления при двухимпульсной (2) и трехимпульсной (3) системе подавления боковых лепестков по запросу

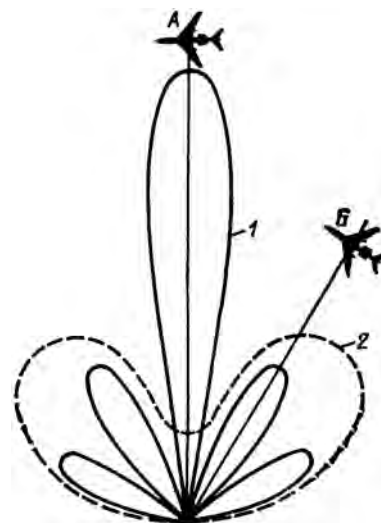
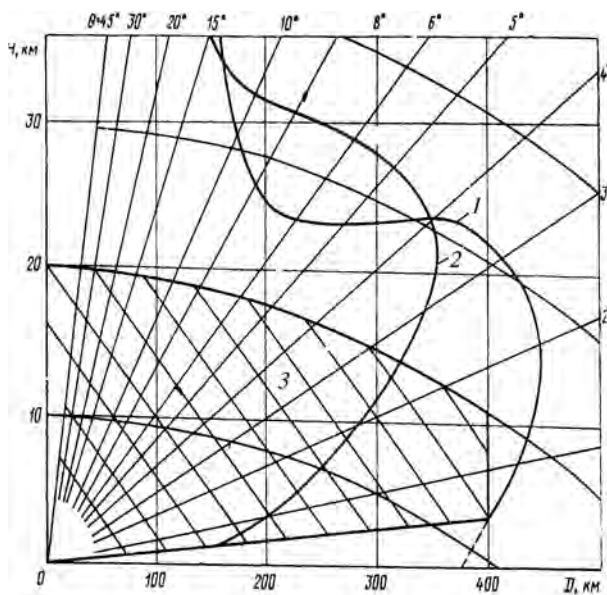


Рис. 135

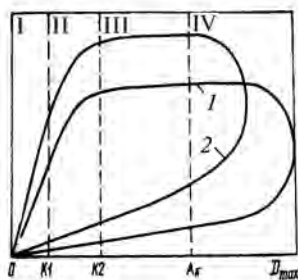
Возможная форма диаграммы направленности антенны ВРЛ (1) и антенны подавления (2) при подавлении сигналов боковых лепестков по ответу



Рис. 136



Диаграммы направленности антенной системы (1 — нижний, 2 — верхний лучи) и зона обнаружения (3) радиолокатора "Скала"



Участки зоны обнаружения радиолокатора "Скала":  
1 — нижняя ДН;  
2 — верхняя ДН

Рис. 137

Обзорно-посадочные радиолокаторы служат для контроля воздушной обстановки в районе аэродрома и получения информации об отклонении летательного аппарата от номинальной линии курса и глиссады. На рис. 141 схематически показана радиолокационная система посадки. Здесь 1 — обзорно-посадочный локатор, 2 — антенна диспетчера, показанная на рис. 130. Круговой обзор пространства производит антенна курса, формирующая для этого ДН типа  $\text{cosec}^2\theta$ . Антенна глиссады сканирует в вертикальной плоскости со скоростью 2÷4 качания в секунду.

Интересна конструкция обзорно-посадочного радиолокатора РП-3Г фирмы "Tesla". Антенная система этого локатора (рис. 142) состоит из антенны курса и антенны глиссады. Обзор пространства осуществляется ими поочередно: антенны развернуты так, что антенна глиссады работает в то время, когда антенна курса повернута в сторону, противоположную сектору посадки.

В радиолокаторе РП-3Г применяют параболические антенны с рупорными облучателями.



Рис. 138

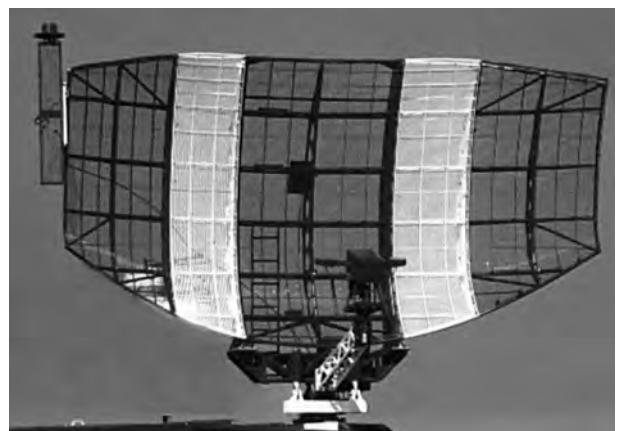


Рис. 139

Два облучателя антенны глissады и четыре облучателя антенны курса обеспечивают эффективное облучение зеркал и низкий уровень боковых лепестков. Функциональная поверхность отражателя антенны курса представляет собой часть параболоида вращения. Требуемая форма ДН в вертикальной плоскости обеспечивается синфазным сложением двух лучей (от 4-х облучателей), пересекающихся на уровне 6 дБ. Функциональная поверхность антенны глissады изготовлена из двух слоев стеклопластика с помещенной между ними перфорированной алюминиевой пластиной. Поверхность отражателей покрывается слоем напыленного цинка и полиуретановым лаком. Для изменения поляризации поля служит тефлоновая пластинка, помещенная вблизи раскрытия и имеющая привод от специального электродвигателя. Зоны обнаружения и диаграммы направленности представлены на рис. 143 и рис. 144 соответственно.

На рис. 145—147 показан еще ряд типичных антенн трассовых локаторов.

После того, как мы получили представление об антеннах аэродромных радиолокаторов, обратимся теперь к рассмотрению антенных систем радиолокационных станций военного назначе-



Рис. 140

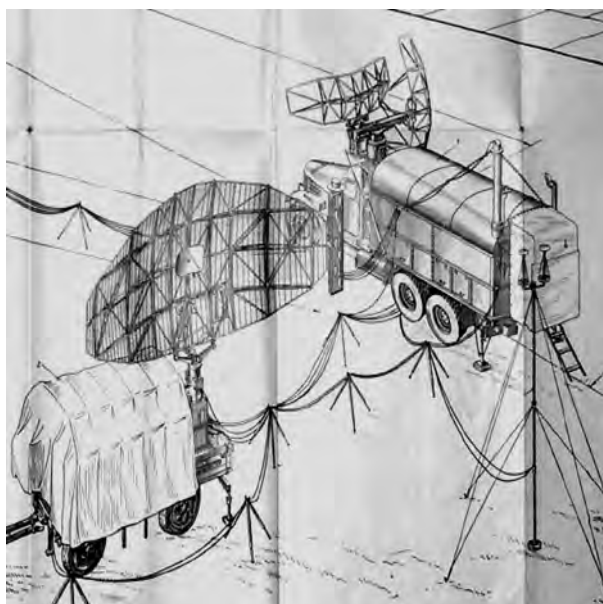


Рис. 141



Рис. 142

ния, предназначенных для обнаружения таких летательных аппаратов как самолеты, вертолеты и ракеты противника с целью наведения на них своих средств поражения в исторической перспективе и развития. Следует добавить, что в последнее время возник целый ряд РЛС для разведки и обнаружения таких объектов, как корабли, всевозможные объекты на поле боя и даже отдельные люди; РЛС применяются для контроля и корректировки артиллерийских стрельб и т. п. и т. д., одним словом, возможности и применимость РЛС безграничны и, как мы увидим, в большинстве случаев наиболее оптимальны-

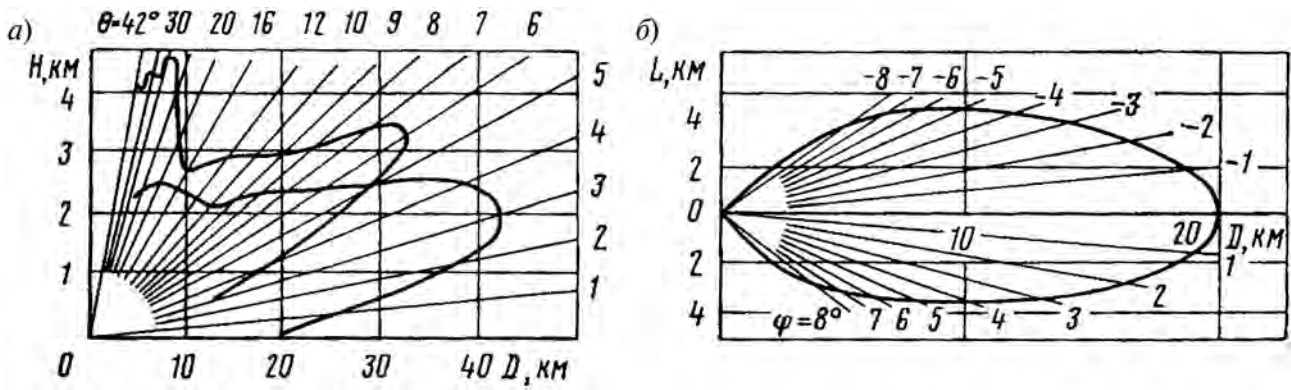


Рис. 143

Зоны обнаружения обзорно-посадочного радиолокатора в вертикальной (а) и в горизонтальной (б) плоскостях:  $H$  — высота полета;  $D$  — дальность;  $L$  — боковое отклонение ЛА от оси БПП

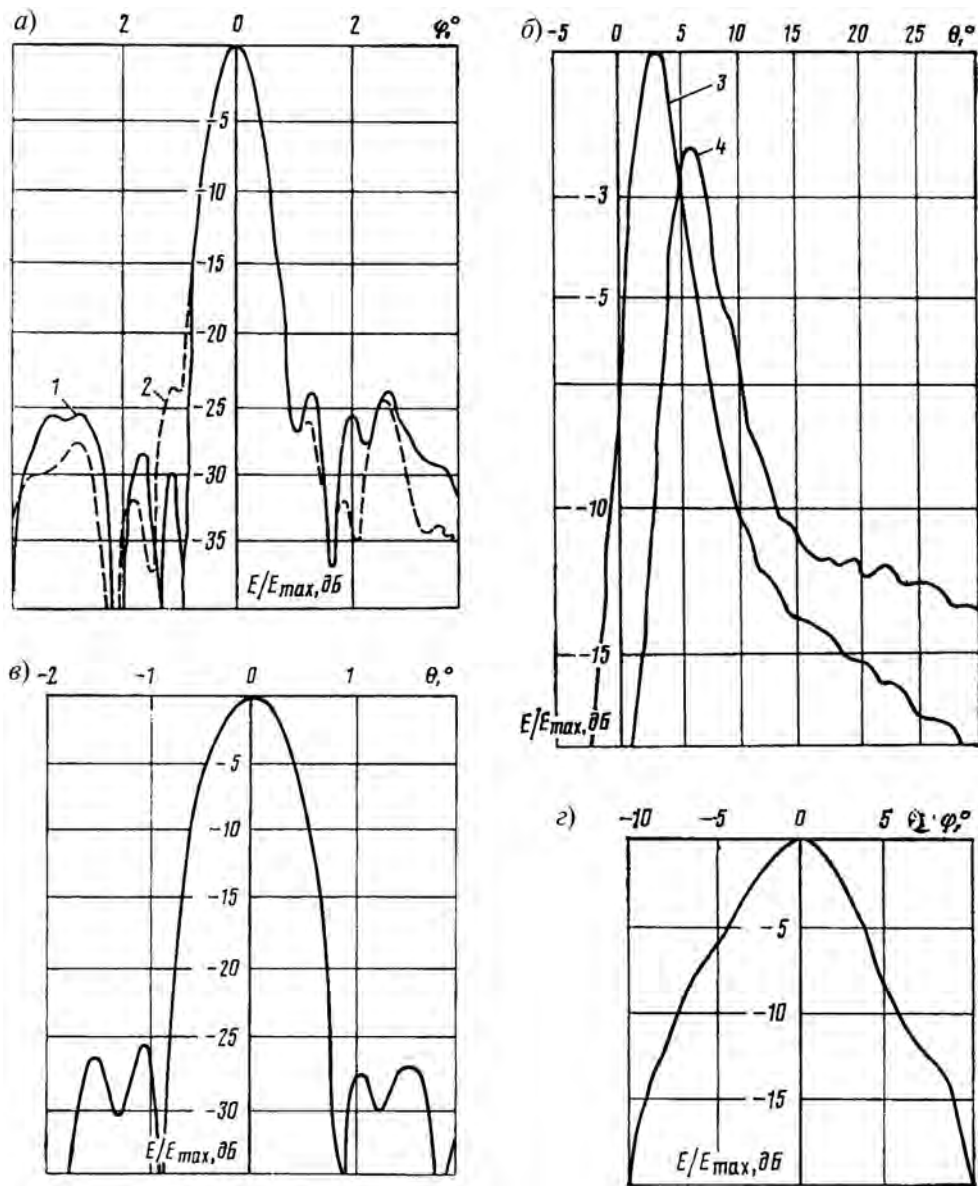


Рис. 144

Диаграммы направленности антенны обзорно-посадочного радиолокатора

а — ДН антенны курса в горизонтальной плоскости; б — ДН антенны курса в вертикальной плоскости; в — ДН антенны глissады в вертикальной плоскости; г — ДН антенны глissады в горизонтальной плоскости; 1 — при максимуме нижней ДН; 2 — при максимуме верхней ДН; 3 — нижняя ДН; 4 — верхняя ДН





Рис. 145



Рис. 146

ми антеннами для РЛС оказываются именно зеркальные антенны.

Первый РЛС с зеркальной антенной в Советском Союзе была станция орудийной наводки (СОН) SCR-584, полученная по лендлизу из США. Эта РЛС считается лучшей станцией орудийной наводки Второй мировой войны. Ее выпуск начался в 1943 году, и предназначалась она для обнаружения подлетающих самолетов и наведения на них зенитных орудий. Вся радиотехническая аппаратура станции размещалась в мобильном фургоне и была очень надежной и удобной в боевом применении.

На рис. 148 показана (схематически) зенитная батарея и станция SCR-584 в процессе взаимодействия с зенитными орудиями, вырабатывая для них все данные для успешной стрельбы по воздушным целям. На этапе поиска цели ан-



Рис. 147

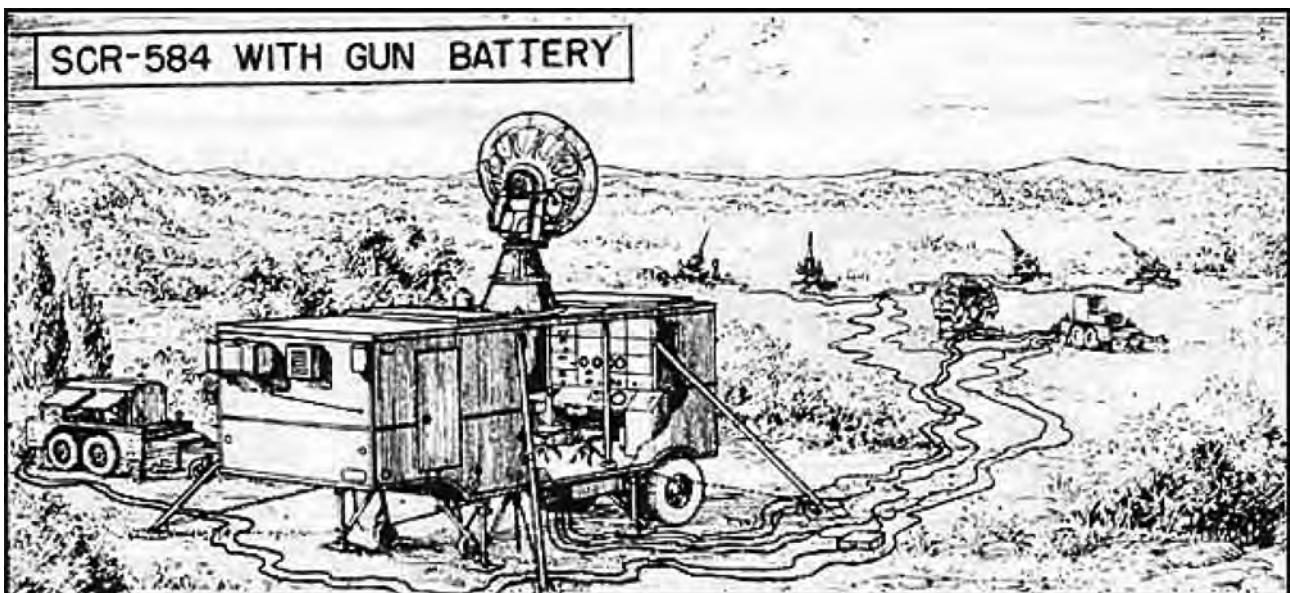


Рис. 148

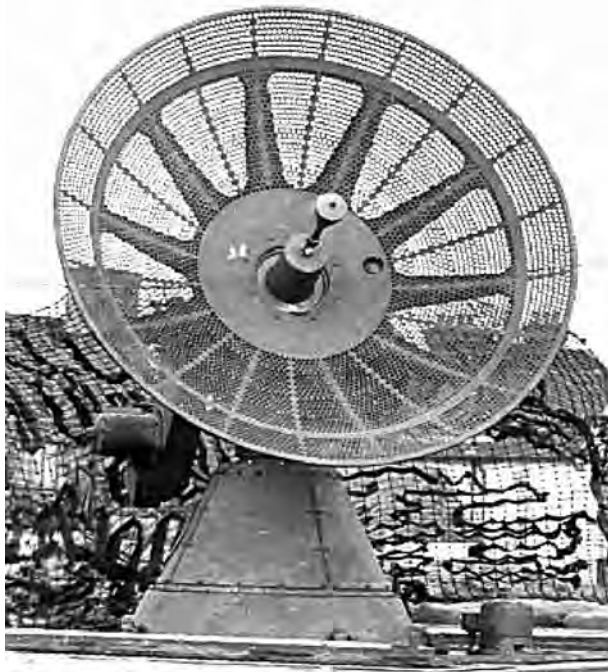


Рис. 149

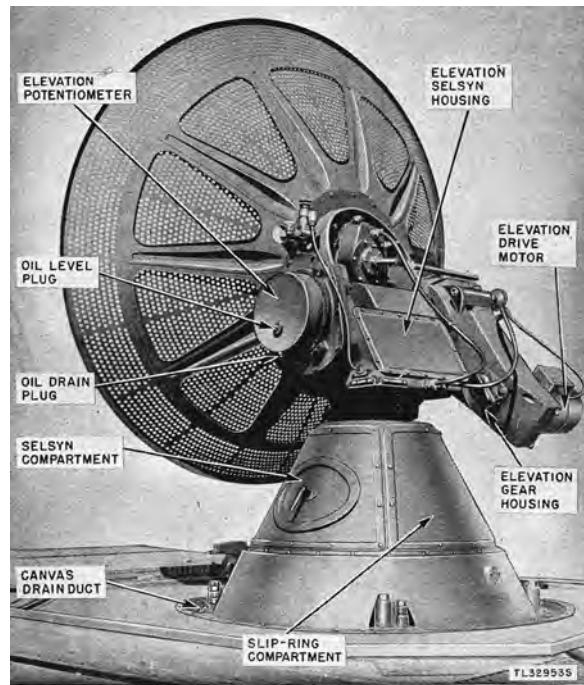


Figure 21. Pedestal.

Рис. 150

тенная колонка обеспечивала вращение антенны по азимуту и одновременно по углу места. Точное определение координат цели производилось по методу конического сканирования. Для его реализации использовался смещенный с оси вибратор с контррефлектором, который вращался вокруг оси антенны. Сочленение вибратора с контррефлектором производилось с помощью радиопрозрачного пластмассового стакана конической формы. Конструкция антенны показана на рис. 149 и рис. 150. Видно, что зеркало имеет перфорацию для уменьшения массы и ветровой нагрузки. Обращает на себя внимание исключительно высокое качество конструкторской и инженерной проработки антенны и опорно-поворотного устройства. Появление SCR-584 в СССР вызвало резкий подъем интереса к радиотехническому обеспечению современных боевых действий (начало 50-х годов): уже самые первые образцы станции поступили на военные кафедры передовых ВУЗов страны для обучения студентов на самых современных образцах техники. Так было в МВТУ им. Баумана, что и определило в дальнейшем научные интересы многих выпускников МВТУ, в том числе и автора настоящей работы.

Все входившие в SCR-584 устройства были последним словом техники (идейно, конструктивно и технологически). Соответственно была поставлена задача создать отечественный аналог этой станции, который и был принят на вооружение в 1950 году под названием СОН-4. Затем последовал целый ряд аналогичных модификаций: СОН-9 (рис. 151) и т. д. Параллельно раз-

вернулись работы по созданию РЛС дальнего обнаружения в мобильном исполнении. РЛС П-20 была первой передвижной станцией дальнего обнаружения и наведения целей: азимут, наклонную дальность и высоту с помощью V-образного луча. Будучи принятой на вооружение, станция широко использовалась в войсках ПВО, ВВС, ВМФ и на больших аэродромах Гражданского воздушного флота в качестве диспетчерской станции. Примененная в П-20 идея V-образного луча реализована во множестве других систем — стационарных и мобильных. После РЛС П-20 для противовоздушной обороны было разработано и принято на вооружение большое количество различных РЛС. Одной из первых



Рис. 151

стала РЛС "Оборона" (рис. 153), предназначенная для обнаружения и измерения дальности и азимута в пределах  $360^\circ$  по горизонту и по углу места до  $17^\circ$  в метровом диапазоне волн. Видно, что антенна имеет сетчатую конструкцию, а ее форма представляет собой часть параболической поверхности, причем размер в горизонтальной плоскости больше, чем в вертикальной плоскости, что обеспечивает создание вертикального веерного луча, поскольку антенна не предназначалась для точного определения угла места цели: эта задача решалась специальными РЛС — высотомерами. Система облучателей, расположенных в вертикальной плоскости, позволяет работать в 3-х режимах обзора пространства: 1) "нижний луч" — с увеличенной дальностью по целям на малых и средних высотах; 2) "верхний луч" — с увеличенной верхней границей зоны обнаружения по углу места; 3) режим сканирования с поочередным включением верхнего и нижнего луча.

Следующая станция РЛС 1Л117М (рис. 154) — трехкоординатная для определения азимута, наклонной дальности и высоты, аналогична станции П-20 по конструкции, но использует более современную элементную базу. Нельзя не отметить, что многие РЛС ПВО в силу особенностей своей конструкции определяли только 2 координаты цели — ее азимут и дальность. Для оп-



Рис. 153



Рис. 154

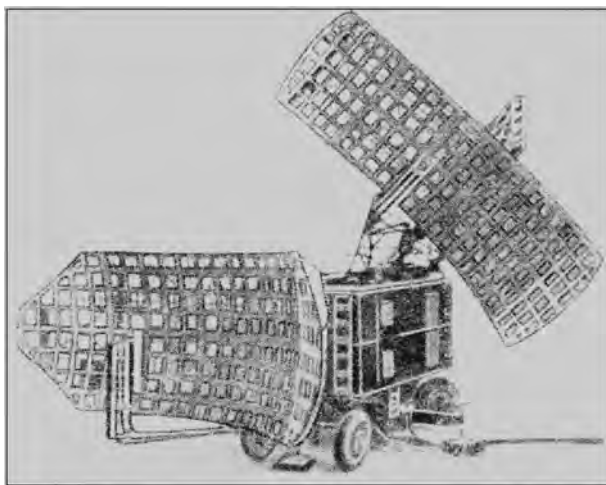


Рис. 152

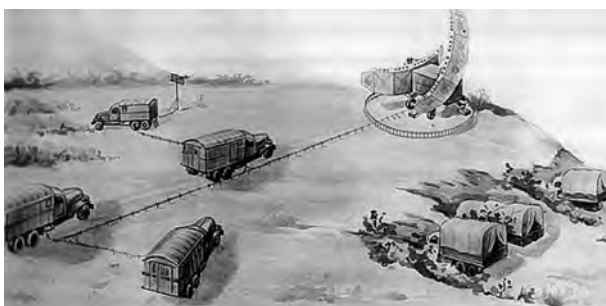


Рис. 152, а



Рис. 155

ределения высоты цели и ее угол места требовались другие антенны и специальные станции — радиовысотомеры. На рис. 155, 156 представлены основные из них. Видна общая особенность их антенн: большой размер в вертикальной плоскости и гораздо меньший размер в горизонтальной плоскости. Это объясняется тем, что для определения угла места цели ( $\alpha$ ) необходимо иметь как можно более узкую ДН в вертикальной плоскости. Тогда, зная угол  $\alpha$  и наклонную дальность  $L$ , можно определить и высоту цели  $H = L \sin \alpha$ .

Интересна конструкция антенны РЛС "Десна": основное зеркало — вертикальный параболический цилиндр, облучаемый линейной решеткой облучателей, что позволяет не только создавать оптимальную ДН в вертикальной плоскости, но также и обеспечивать сканирование в этой плоскости. Станция кроме обычных обзорных функций выдает боевую информацию для наведения истребителей и дает целеуказания зенитным ракетным комплексам. На рис. 157 показаны антенна РЛС "Десна" и станция вместе с высотомером. Станция работает по целям на средних и больших высотах.

Радиолокационная станция "Каста" демонстрирует появление новых тенденций в борьбе с летательными аппаратами противника — появление низколетящих (на высоте нескольких десятков метров над поверхностью земли) целей



Рис. 156

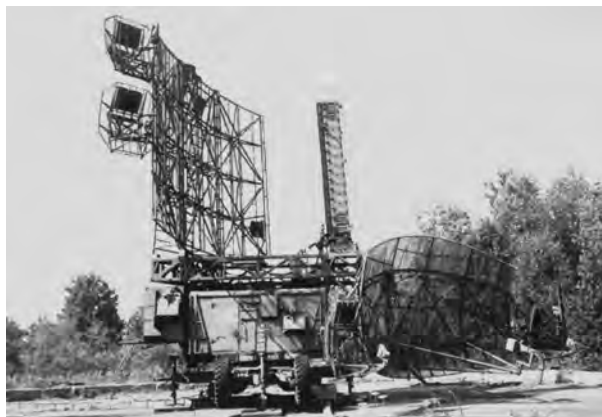


Рис. 157

с малой отражающей поверхностью. Обнаружение таких объектов с помощью таких антенн, как "Оборона" затруднительно, т. к. их ДН "цепляется" за землю и экран индикатора кругового обзора засвечивается в ближней зоне. Выход только один — уменьшать размеры антенны и ставить их как можно выше. Станция "Каста-2Е1" конструктивно соответствует этой тенденции. Она предназначена для обнаружения объектов, летящих на малых и предельно малых высотах, на фоне интенсивных отражений от подстилающей поверхности, местных предметов и гидрометеобразований. Антенна представляет собой систему, состоящую из расположенных в два этажа зеркальных антенн с облучателями. Каждое зеркало выполнено из металлической сетки, имеет овальный контур ( $5,5 \times 2$  м) и состоит из отдельных секций. Это дает возможность укладывать антенну достаточно компактно при транспортировке. При расположении антенн на машине (как на рис. 158) фазовый центр антенной системы находится на высоте 7 м. Возможно построение антенны с подъемом на специальной перевозимой мачте высотой 50 м.

РЛС "Каста-2Е2" специально сконструирована для установки на мачте высотой 50 м (рис. 159). Зеркало — двойной кривизны, система облучателей позволяет формировать два луча — острый и косекансный, перекрывающий заданный сектор обзора. Вращение по азимуту осуществляется специальным электродвигателем при неподвижной мачте, что обеспечивает достаточную устойчивость антенн при сканировании. Как видно, РЛС "Каста" впервые использует подъем антенны на значительную высоту именно для того, чтобы иметь возможность работать по низколетящим целям.

Рассмотренные РЛС, кроме SCR-584, предназначались в основном для обнаружения летательных аппаратов и определения их координат. В процессе их уничтожения они участия не принимали и не занимались управлением зенитным огнем. В то время как станция орудийной навод-

ки SCR-584 входила в состав батарейного комплекса вместе с прибором управления зенитным огнем (ПУАЗО). Таким образом, это был первый зенитно-орудийный комплекс. С этого времени противовоздушная оборона на всех уровнях пошла по пути создания зенитно-пушечных комплексов, в которых РЛС использовалась не только для обнаружения целей, но и для управления процессом наведения ракет и снарядов на цель.

Впервые эта задача встала исключительно остро (быть или не быть!) вскоре после окончания 2-ой мировой войны, когда началась "холодная война", и появилось атомное оружие и средства его доставки — бомбардировщики и ракеты. В 1950 году Сталин принял решение о создании такой противовоздушной обороны Москвы, чтобы ни один самолет с какой бы стороны он не прилетел, не смог проникнуть через систему ПВО. Создание непроницаемой московской ПВО, наряду с атомным оружием и средствами его доставки — баллистическими ракетами, стало одной из важнейших государственных оборонных задач.

Согласно легенде, основные идеи этой системы ПВО были изложены в дипломном проекте Серго Берия, который он выполнил под руководством Н. П. Куксенко и защитил в 1947 году. Срочно назначенная комиссия из выдающихся специалистов на государственном уровне подтвердила в целом разумность предложенной концепции противовоздушной обороны. Так возник проект под названием "Беркут", которое образовалось из начальных букв фамилий Берия и Куксенко, которые были назначены главными инженерами проекта в специально созданном КБ-1.

Не вдаваясь в детали драматической и детективной истории этого проекта, завершение которого происходило на фоне смерти Сталина и расстрела Л. П. Берия и снятия с должности главного конструктора С. Л. Берия, обратимся к рассмотрению антенной системы проекта, который, в конце концов, стал называться "Проект С-25".

Основная задача, которую должна была решать антенная система, состояла в том, что необходимо было обеспечить одновременное сканирование двух веерных лучей в двух взаимноперпендикулярных плоскостях для определения 3-х координат цели в заданном секторе углов. В этом случае объединялись функции обзорного локатора и высотомера. Эта задача была решена путем одновременного использования двух отдельных антенных систем — азимутальной и угломестной. Угломестная антенна сканировала в вертикальной плоскости, а азимутальная — в горизонтальной плоскости с некоторым наклоном. Конструктивно было принято самое простое и тривиальное решение: каждая антенна — азимутальная и угломестная — составлялась из 6-ти формирователей веерообразных лучей, сдвинутых относительно друг друга по окружности на  $60^\circ$ . Такой угол определялся зоной ответственности каждой



Рис. 158



Рис. 159

отдельной станцией в системе ПВО. Каждый из формирователей веерных лучей представляет собой простейший волноводный коллиматор типа "сыр" с параболическим отражателем, показанный на рис. 2. Три "сыра" объединяются в одну плоскую группу (рис. 160). Из двух плоских групп, повернутых относительно друг друга на  $60^\circ$ , образуется общая двухслойная конструкция, схематически представленная на рис. 161. Подключение очередных "сыров" через каждые  $60^\circ$  поворота антенн к соответствующим приемопередающим трактам обеспечивало непрерывное сканирование сектора ответственности локатора в азимутальном и угломестном направлении. Реальный вид антенн показан на рис. 162 и 163. Такие антенны были установлены на всех пунктах ПВО, окружавших Москву двумя кольцами обороны и около 30-ти лет исправно несшие боевое дежурство. После создания и апробации подмосковной стационарной системы ПВО С-25 на повестку дня была поставлена задача создания аналогичных систем в мобильном исполнении, чтобы можно было оперативно создавать системы ПВО в необходимых районах, в том числе по мере необходимости и в других странах. Соответственно, в короткие сроки были созда-

ны перевозимые комплексы С-75 и С-125. Наиболее продвинутым вариантом системы С-75, который постоянно модернизируется, стал ЗРК "Волга-2". Соответствующая РЛС сопровождения и наведения РСН-75В и входящий в систему радиодальномер РД-75 показаны на рис. 164—166.

В эти годы проводятся работы по созданию все более совершенных РЛС ПВО. Так, для целей ПВО была крайне необходима мощная трехкоординатная высокопотенциальная РЛС, способная обеспечивать информацией как зенитные ракетные войска, так и авиацию в условиях массированного применения активных и пассивных помех. В середине 70-х годов появился новый радиолокационный комплекс СТ-67 "Салют", который являлся трехкоординатной системой — он не нуждался в радиолокационных высотомерах и мог один раз за обзор одновременно определять дальность, азимут и высоту цели на расстоянии до 400 км. Антенна показана на рис. 167 и рис. 168, и использовалась в дециметровом диапазоне.

Начало 1950-х годов было отмечено регулярными полетами стратегических самолетов-разведчиков над территорией СССР. Средств не только уничтожения вражеских самолетов, но даже их обнаружения у Советского Союза по-

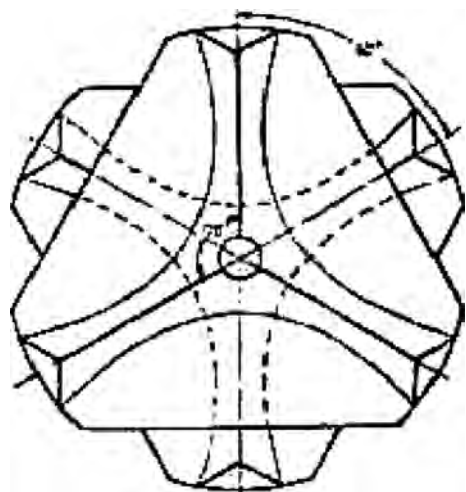


Рис. 160

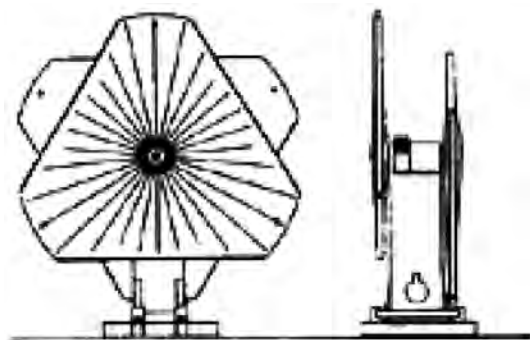


Рис. 161



Рис. 162



Рис. 163



Рис. 164



Рис. 166

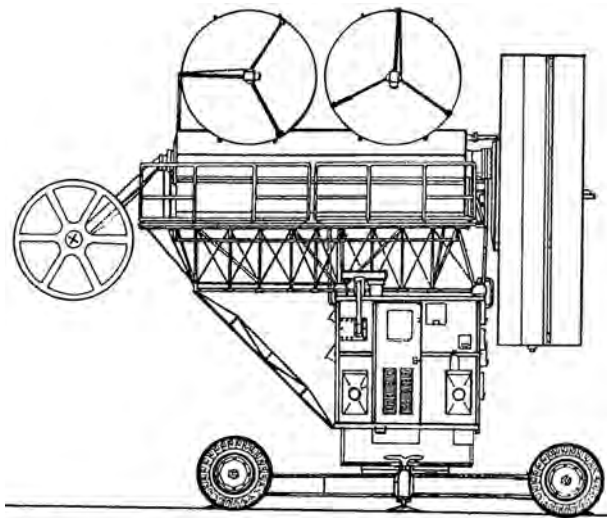


Рис. 165

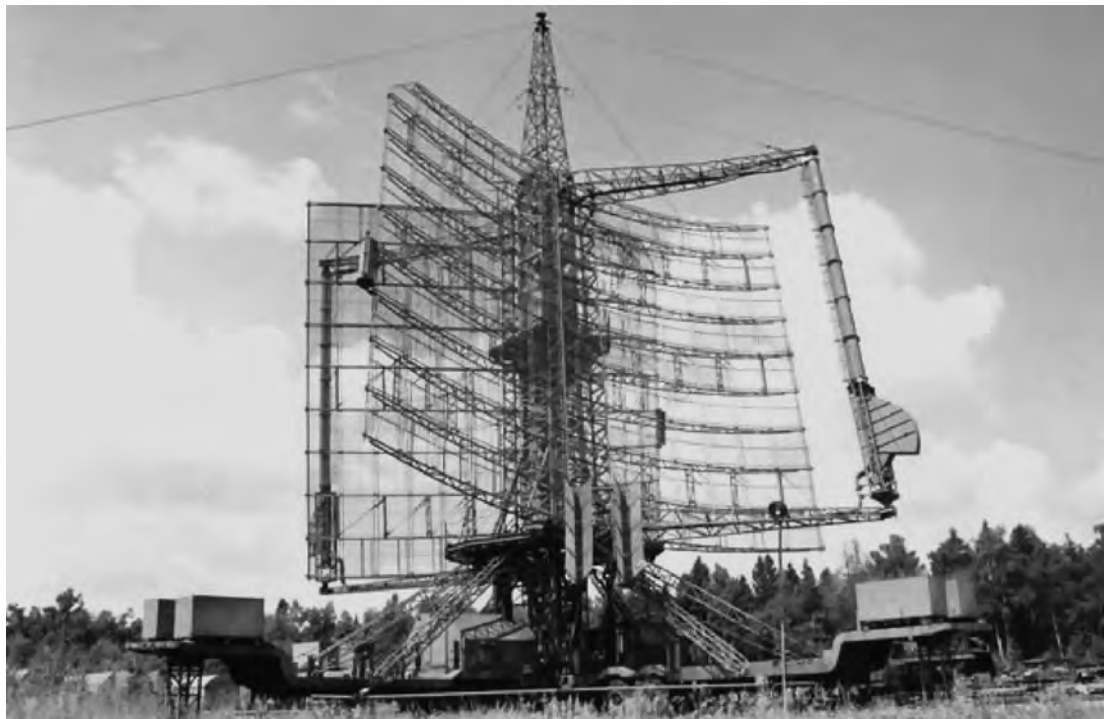


Рис. 167



Рис. 168

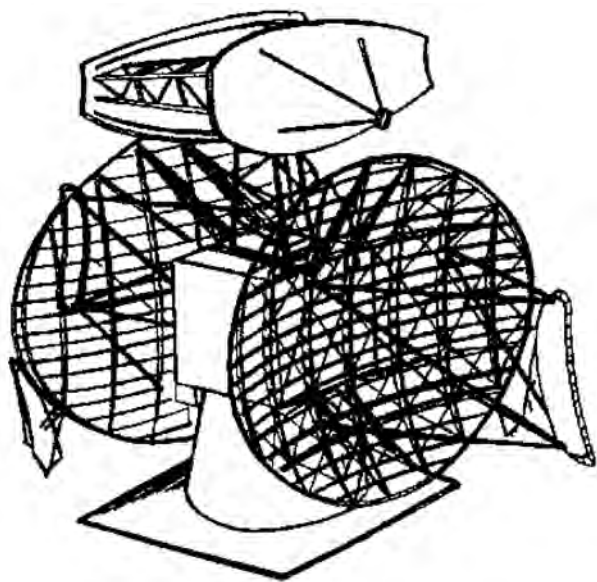


Рис. 169

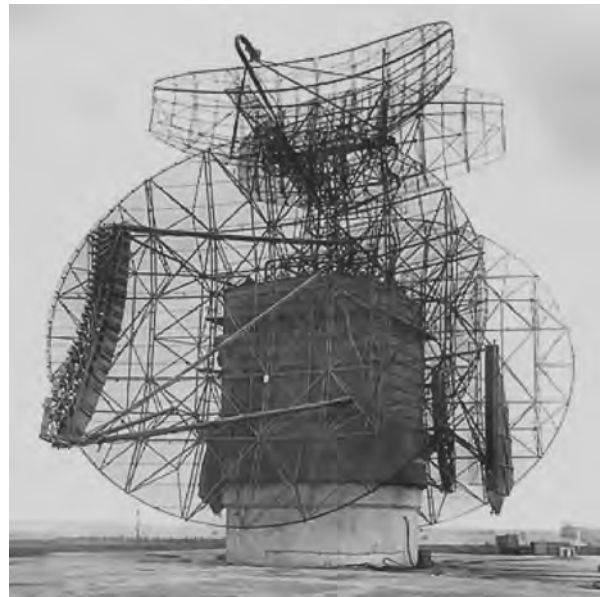


Рис. 170



Рис. 170, а

просту не было. Одним из действенных ответов на новые вызовы и угрозы явилось создание РЛС П-90 "Памир" с антеннами, развернутыми по азимуту на 180°, что позволяло получать более высокий темп обзора пространства. Схема антенны показана на рис. 169, а сама антенна на рис. 170.

На рис. 170 показана РЛС наземной артиллерийской разведки с зеркальными антеннами "Кольчуга". Эта РЛС предназначена для определения координат артиллерийских батарей и минометов, например, обстреливающих колонну танков на марше.



Мобильный комплекс С-75 предназначался только для оперативного развертывания системы ПВО в заданном районе, но он не годился для частой смены позиций, переезда на неподготовленные позиции и не мог двигаться в составе мобильных войсковых групп. Такая задача была впервые поставлена перед зенитно-ракетным комплексом "Круг", который предназначался для эффективного прикрытия войсковых группировок и важнейших тыловых объектов фронта от ударов различных аэродинамических средств воздушного нападения. Высокомобильный комплекс "Круг" относится к первому поколению зенитно-ракетного вооружения войсковой противовоздушной обороны. ЗРК "Круг" может работать вполне автономно, и все его боевые средства размещены на унифицированных самоходных гусеничных шасси высокой проходимости. "Круг" на марше показан на рис. 171. Результаты испытаний войсковых стрельб и многолетней эксплуатации ЗРК "Круг" и его модификаций в ПВО Сухопутных войск доказали их высокие боевые возможности, эффективность и надежность.

В составе комплекса имелась РЛС обнаружения целей П-40 "Броня" с радиовысотометром ПРВ-9 или П-2. Антенна "Брони" (рис. 172) при круговом обзоре последовательно формировала в угломестной плоскости 4 луча: два нижних 2 и 4° и два верхних 10 и 14° (последний косекансквадратной формы). РЛС наведения ракет комплекса "Круг" представляла собой сложную конструкцию с круговым вращением (рис. 173—174, а). Наиболее крупный ее элемент — антенна целевого канала, рядом размещена антенна узкого луча ракетного канала. Эти антенны представляют собой двухзеркальные апланатические антенны с поворотом плоскости поляризации, предложенные и разработанные автором настоящей работы в начале 60-х годов в НИЭМИ (НИИ-20, п/я 44) [6, 7, 8]. Осо-

Рис. 171



Рис. 172



Рис. 173



Рис. 173, а

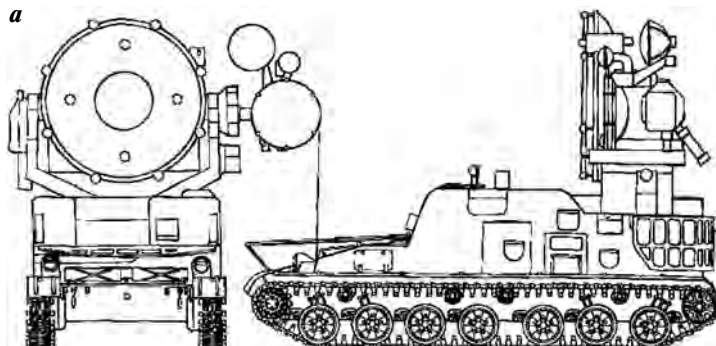




Рис. 174

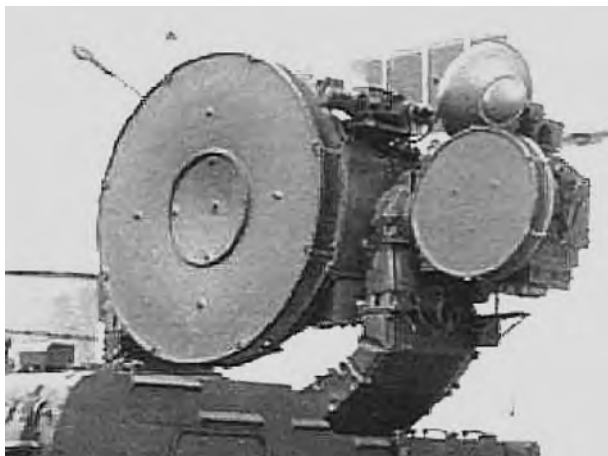


Рис. 174, а

в составе комплекса несколько могучих гусеничных транспортеров, то перед разработчиками "Осы" ставилась диаметрально противоположная задача — создать впервые автономный комплекс (все в одном) с размещением на одном самоходном плавающем шасси всех боевых средств — все РЛС и пусковой установки ракет. Тактико-технические требования также были существенно другими — максимальная дальность до 9 км, высота от 50 м до 5 км. В итоге получилась машина, парадный вариант которой показан на рис. 175, 175, а. По сравнению с "Кругом" просто игрушка, которая оказалась твердым орешком в процессе создания. Конструкторская идея "Осы" не получила дальнейшего развития и ей на смену пришел более капитальный "Куб".

Самоходный ЗРК "Куб" — зенитное средство ПВО малой дальности, которое предназначалось для защиты войск и объектов при расположении их на месте и в ходе боевых действий. К боевым средствам ЗРК "Куб" относятся самоходная установка со станциями разведки и наведения и четыре пусковых установки с ракетами (рис. 176). Станция обнаружения (разведки) цели с антен-



Рис. 175



Рис. 175, а

бенностью большой антенны (рис. 173) являлся предельно малый ее осевой размер. Применение таких антенн диктовалось необходимостью как реализации заданного сектора электромеханического сканирования в вертикальной плоскости, так и требованием минимального осевого размера антенны в походном положении, когда антенна укладывалась на поверхность башни для обеспечения прохода под мостами путепроводов. Порядок расчета таких антенн рассмотрен в разделе, посвященном двухзеркальным апланатическим антеннам.

После ЗРК "Круг" настала очередь ЗРК "Оса", который также создавался в НИИ-20 и стоил карьеры многим главным конструкторам. Если "Круг" имел максимальную дальность поражения целей до 50 км на высоте до 23 км и имел



Рис. 176

Рис. 177

ной специфического вида — антенна с веерным лучом, который по азимуту имеет ширину  $1^\circ$ , а суммарный сектор обзора по углу места составляет  $20^\circ$ . Станция наведения и сопровождения цели имеет 2 независимых канала, излучатели которых установлены в фокальной плоскости параболического зеркала общей антенны сопровождения и подсветки цели. Обе антенны (рис. 177) вращаются независимо друг от друга в процессе обнаружения и поражения цели. Система очень грозная, но уж очень неповоротливая, совершенно не приспособленная для борьбы с мгновенно возникающими и также мгновенно исчезающими вертолетами и самолетами, о чем красноречиво свидетельствуют итоги локальных войн, в которых принимал участие этот ЗРК.

На рис. 178—180 представлены ЗРК "Тор" и "Шилка" с зеркальными антеннами. Недостатком "Шилки" оказалась неэффективность ее РЛС, которая имеет только одну антенну

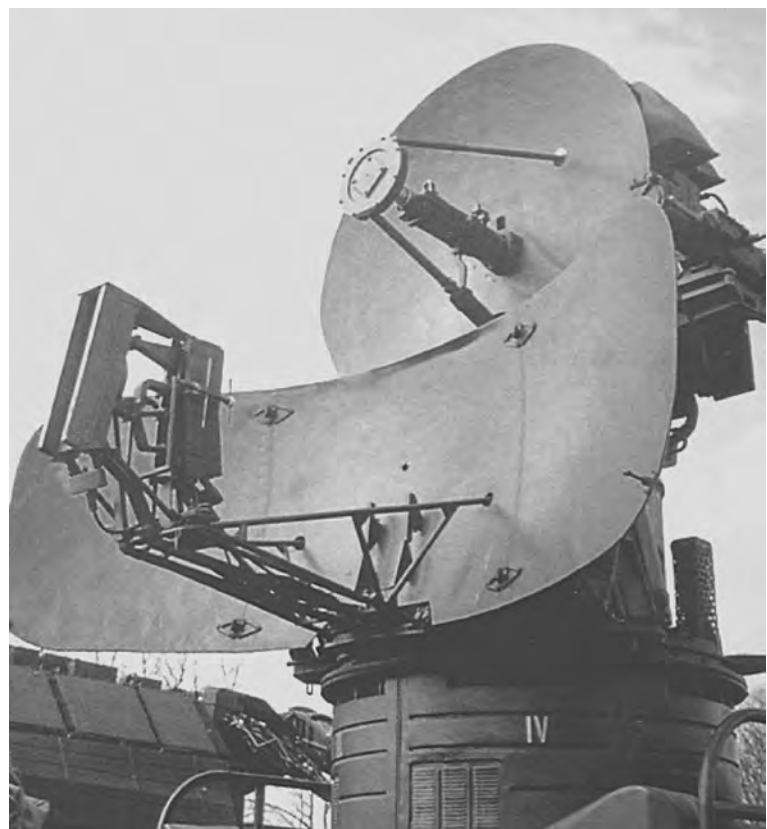




Рис. 178



Рис. 178, а



Рис. 179

(рис. 180) и нуждается в целеуказании, т. к. одна антенна не может одновременно и вести поиск целей, и наводить на них свои средства поражения.

В этом отношении гораздо более эффективной оказалась "Тунгуска" — зенитный ракетно-пушечный комплекс, особенно при решении задач борьбы с боевыми вертолетами на поле боя. Вертолеты, вооруженные противотанковыми управляемыми ракетами, смертельно опасны для танков, которые не способны эффективно бороться с такими вертолетами.

ЗРК "Тунгуска" (рис. 181) представляет собой автономный высококомобильный комплекс ближнего действия, предназначенный для борьбы с самолетами, вертолетами, крылатыми ракетами и т. п. Его боевые возможности обеспечивают непосредственное прикрытие войск и отдельных объектов в наступательном и оборонительном бою, на марше и при расположении на месте. ЗРК "Тунгуска" — первый в мировой практике ракетно-пушечный зенитный комплекс. Бронированная герметизированная башня, кондиционер, отопитель и фильтровентиляционная установка обеспечивают нормальные условия жизнедеятельности экипажа, защиту его от пуль и средств массового поражения.

"Тунгуска" имеет дальность поражения 4—8 км и очень малое время готовности к стрельбе (8—10 сек), что является ее решающим преимуществом перед другими системами. В связи с наличием системы стабилизации башни применяется наведение и стрельба на ходу, что особенно важно для поражения боевых вертолетов. Такие вертолеты прячутся в засаде на пути движения танков за лесом, в оврагах и т. п., выставив из-за укрытия только свою наддулочную радиолокационную и оптическую систему. Они таким образом выбирают цель, мгновенно возникают на 30—40 секунд, успевают прицелиться, пустить ракеты и также мгновенно скрыться. Соответственно, ЗРК, следующий в составе танковой колонны, должен успеть в автоматическом режиме за считанные секунды обнаружить такой вертолет и не дать ему возможность сделать свое черное дело, потому что в числе первых целей, по которым будет стрелять вертолет, это как раз и будет ЗРК.

Наличие у "Тунгуски" скорострельных автоматических пушек 30-миллиметрового калибра (скорострельность около 5000 выстрелов в минуту) и управляемых ракет — все это делает данный ЗРК одним из лучших в своем классе. Принята на вооружение в 2003 году.

Считается, что развитием ЗПРК "Тунгуска" стал более дешевый колесный комплекс "Панцирь" в различных модификациях (рис. 182—184). С антенной точки зрения представляет интерес антенна управления огнем "Шлем" (первоначальное название "Роман"). Под одним обтекателем (рис. 185) располагается две зеркальные антенны (рис. 186): одна мм-, а другая см-диапазона. Поскольку их конструкция достаточно очевидна, мы на них останавливаться специально не будем. Предполагается, что благодаря более совершенной системе управления огнем "Панцирь" может одновременно поражать ракетами две цели, в то время как "Тунгуска" поражает ракетами одну цель. По высоте поражаемой цели также имеет преимущество: 5 метров по сравнению с 15 метрами "Тунгуски".

Рассуждая о зловещих возможностях боевых вертолетов по уничтожению танков, следует оценить их реальные возможности по разведке и целеуказанию. Наибольший практический интерес представляет так называемая надвтулочная радиолокация, а точнее комплекс РЛС плюс оптические средства, включая инфракрасные. Такая "надвтулка" приведена на рис. 187, 188. Благодаря наличию такой конструкции вертолет может производить поиск целей, укрываясь, например, в складках местности, выставив из-за укрытия только свою "макушку". Определив цели, вертолет "подскакивает" на несколько секунд и обрабатывает цели своими средствами поражения или передает информацию другим вертолетам, находящимся вне пределов досягаемости наземных ЗРК. Это как кривое ружье, стреляющее из-за угла: самого стрелка не видно, а пуля свистят.

В качестве надвтулочной РЛС планируется использовать на вертолете Ми-28н "Ночной охотник" бортовую РЛС "Арбалет" в шаровом обтекателе над втулкой несущего винта. РЛС "Арбалет" имеет в своем составе (рис. 189)

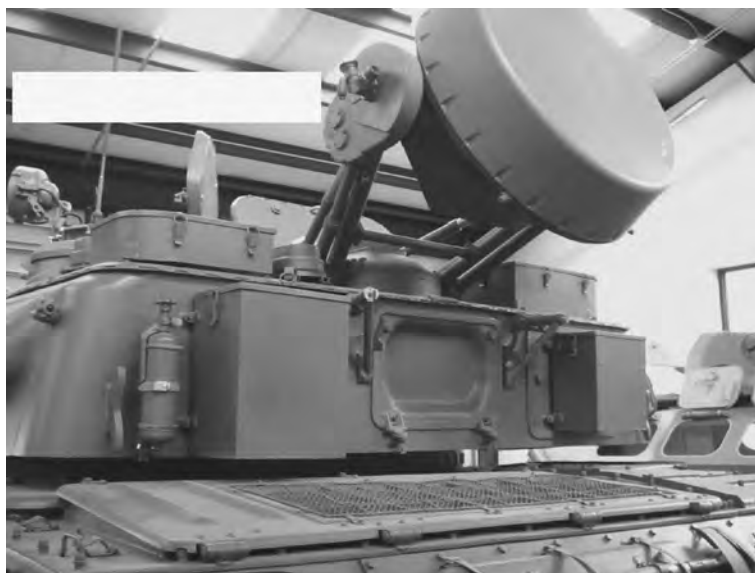


Рис. 180



Рис. 181



Рис. 182

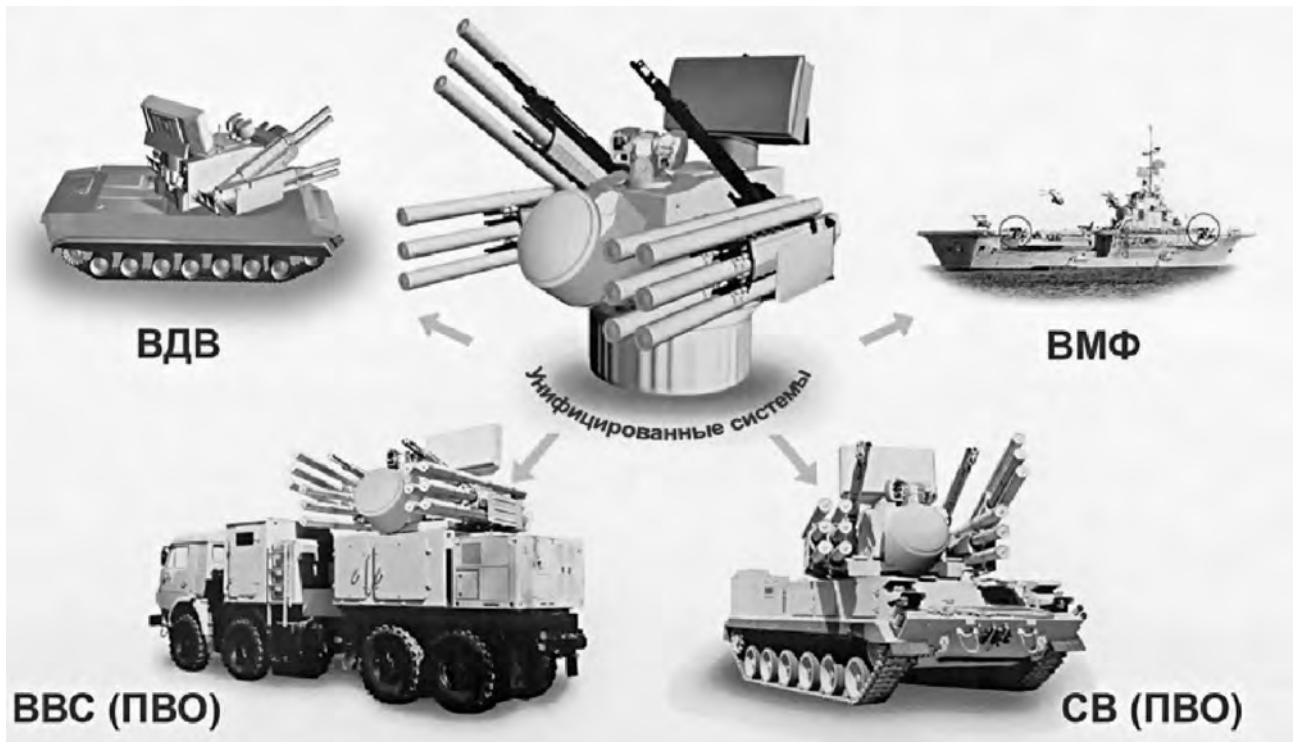


Рис. 183



Рис. 184



Рис. 185



Рис. 188

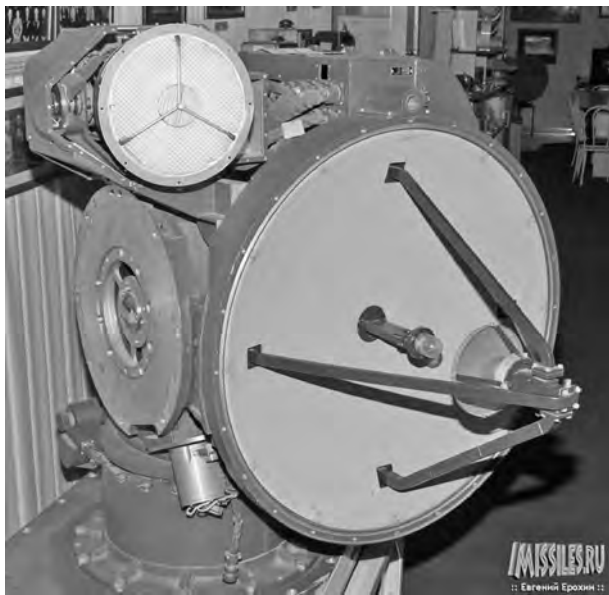


Рис. 186

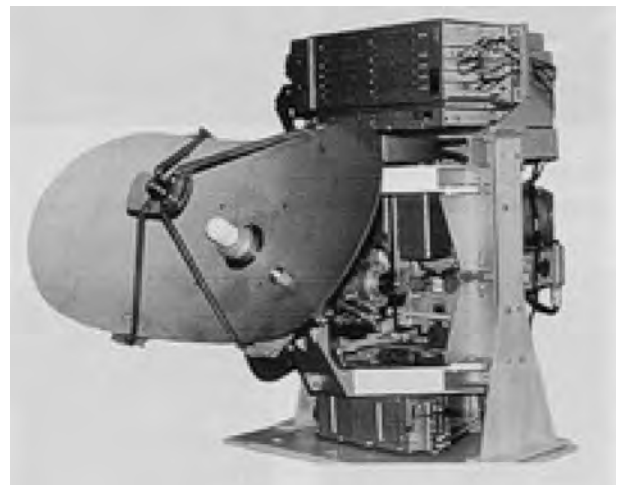


Рис. 189



Рис. 187

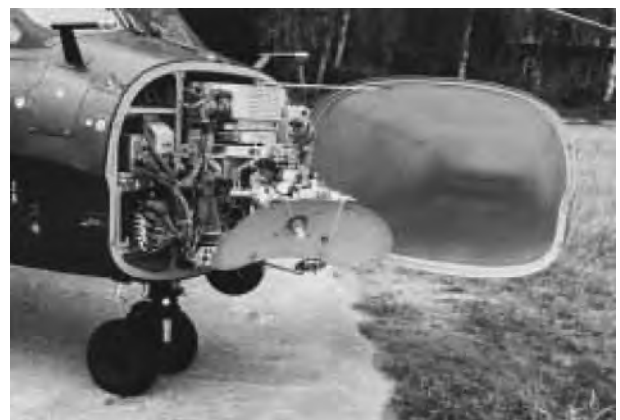


Рис. 189, а

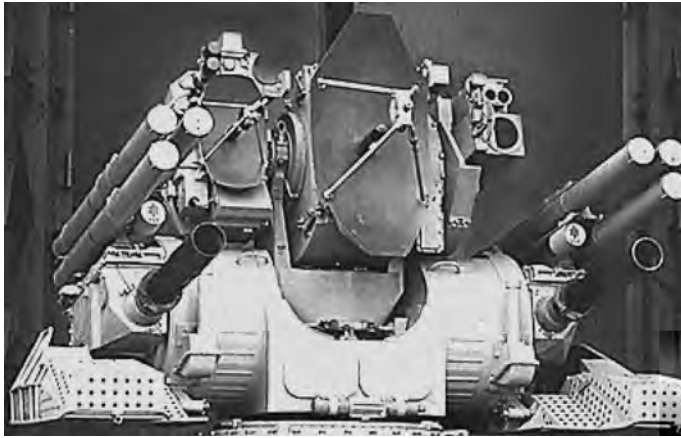


Рис. 190

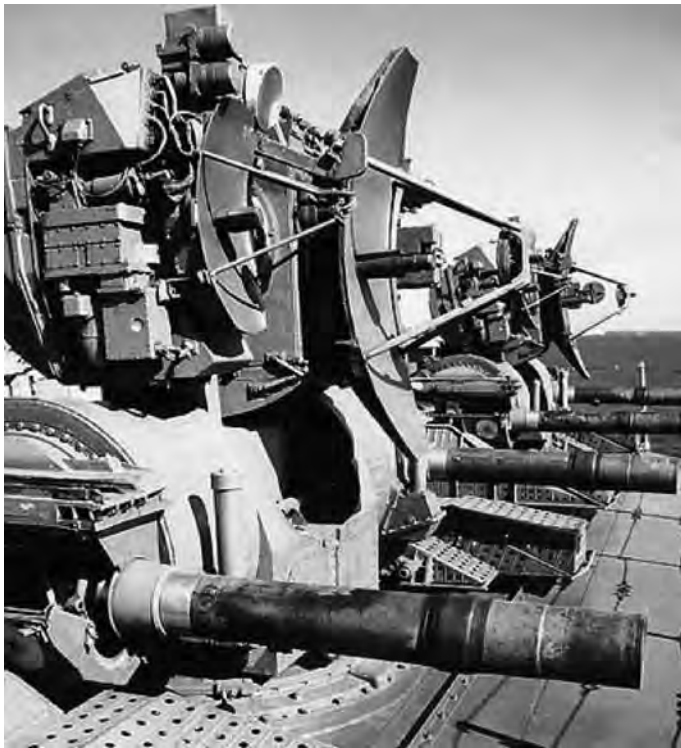


Рис. 191



Рис. 192

двухзеркальную антенну, форма которой типична для большинства обзорных РЛС: размер антенны в горизонтальной плоскости больше, чем ее размер в вертикальной плоскости. Такую же систему имеет и известный вертолет "Апач".

После обсуждения "Тунгуски" и "Панциря" нельзя не обратиться к их морскому собрату — ракетно-артиллерийскому комплексу "Кортик", разработанному на том же "Туламашзаводе". ЗРАК "Кортик" предназначен для поражения целей ракетами на рубеже 1,5÷8 км, а затем дострел уцелевших целей 30-мм автоматическими пушками. В полной красе "Кортик" представлен на рис. 190. Видны две двухзеркальные антенны, которые могут сканировать самостоятельно по углу места и вместе с башней по азимуту. На рис. 191 видны два комплекта "Кортика" без зенитных управляемых ракет.

Теперь еще несколько слов о корабельных и береговых ЗРК, оснащенных зеркальными антеннами. Первым ракетным комплексом, принятом на вооружение в 1962 году для кораблей, был ЗРК "Волна" средней дальности. Для управления огнем была разработана система радиолокационных станций, антенны которых показаны на рис. 192. Для наведения ракеты на цель на антенном посту использовались антенны, имеющие форму несимметричных вырезов из параболоидов вращения с вынесенным фокусом. Две малые антенны служат для грубого наведения ракеты на цель на начальном этапе траектории, а две большие — для сопровождения цели и точного вывода ракеты на цель, и одна антенна — для передачи команд.



Cross Swords Engagement Radar  
S4-14-2 Naval SAM

Рис. 193





Рис. 194



Рис. 195

Через 20 лет после принятия на вооружение ЗРК "Волна" был разработан ЗРК "Кинжал" ("Клинок") — многоканальный автономный комплекс, оснащенный собственными радиолокационными средствами обнаружения. Основой комплекса является отражательная ФАР и зеркальная параболическая антенна с вынесенным фокусом и веерным лучом в угломестной плоскости. Такая антенна традиционно почти во всех ЗРК используется для поиска целей и определения их координат в первом приближении в секторе  $60 \times 60^\circ$ . Кроме зенитных управляемых ракет комплекс "Кинжал" может управлять огнем 30-мм автоматических пушек. Время реакции комплекса составляет от 8 до 24 секций. Схема антенного поста и его общий вид с автоматической пушкой показан на рис. 193 и рис. 194.

В 1969 году был принят на вооружение корабельный ЗРК средней дальности "Шторм". Радиолокационный комплекс содержит простейшие параболические антенны — две большие антенны в нижнем ярусе входят в состав РЛС сопровождения целей; две параболические антенны в верхнем ярусе входят в состав РЛС сопровождения ракет. В промежутке находится антенна для передачи команд на наводимую ракету (рис. 195).

Кстати, на рис. 196 виден морской аналог антенного поста комплекса "Ока".

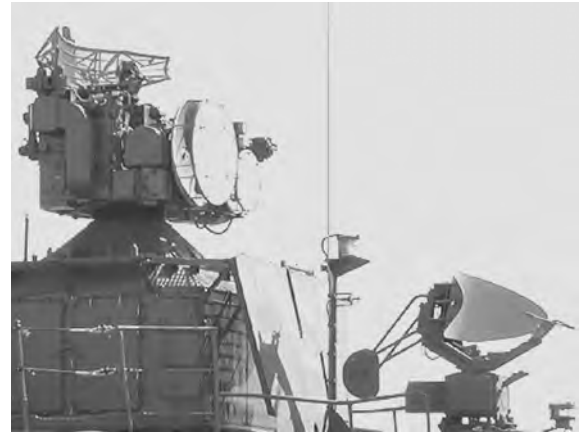


Рис. 196



Рис. 196, а



Рис. 196, б

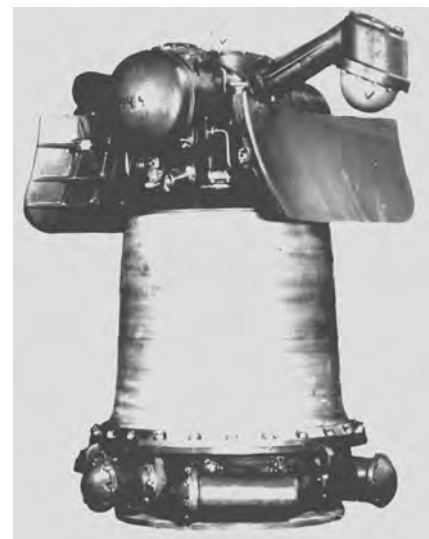


Рис. 196, в

Корабельная РЛС обнаружения воздушных и надводных целей МР-800, определяющая координаты целей в дециметровом диапазоне волн на дальности до 500 км, показана на рис. 196, а. Несколько меньшую дальность обеспечивает корабельная РЛС МР-310 (рис. 196, б). На рис. 196, в показан антенный пост РЛС "Радиян" подводной лодки в надводном положении.

Завершая знакомство с антенными системами зенитных ракетных комплексов, отметим еще две весьма оригинальные комбинации зеркальных антенн. Так, на рис. 197 показан антенный пост зенитного ракетного комплекса С-125 "Нева" ("Печора"), а на рис. 198 антенна зенитной ракетной системы большой дальности С-200 "Ангара".

После ознакомления с российскими РЛС, имеющими в своем составе зеркальные антенны, целесообразно хотя бы бегло ознакомиться с соответствующими зарубежными разработками, чтобы оценить наш отечественный уровень антенной техники. Начнем с известной американской системы, которая носит название "Хок" и "Усовершенствованный Хок".

ЗРК "Хок" — стационарный комплекс среднего радиуса действия (США), предназначенный для поражения воздушных целей на малых и средних высотах. Имеет в своем составе (рис. 199—202) импульсную РЛС целеуказания для обнаружения целей на больших и средних высотах: двоякая антенна показана на рисунке; РЛС целеуказания, работающую в режиме непрерывного излучения для обнаружения воздушных целей на малых высотах, а также РЛС подсветки целей с цилиндрической антенной и радиолокационный дальномер стандартной конфигурации. Не-

смотря на то, что ЗРК "Хок" в настоящее время находится на вооружении, его разнородное радиолокационное оборудование далеко не поражает воображение! Время готовности к стрельбе у комплекса составляет 1,5 мин, что по сравнению с другими ранее рассмотренными системами, очень много: с такой реакцией можно обороняться только от "кукурузников".

Английский корабельный комплекс "Sea wolf" представляется гораздо более интересным с антенной точки зрения. Как это видно из рис. 203, здесь все антенны сосредоточены в пределах одного поста и входят в состав импульсно-доплеровской РЛС обнаружения воздушных целей, подводных целей и РЛС сопровождения целей. Похоже, что одна антенна может быть двухзеркальной с поворотом плоскости поляризации. Готовность к стрельбе после обнаружения цели менее 10 секунд.



Рис. 198



Рис. 197

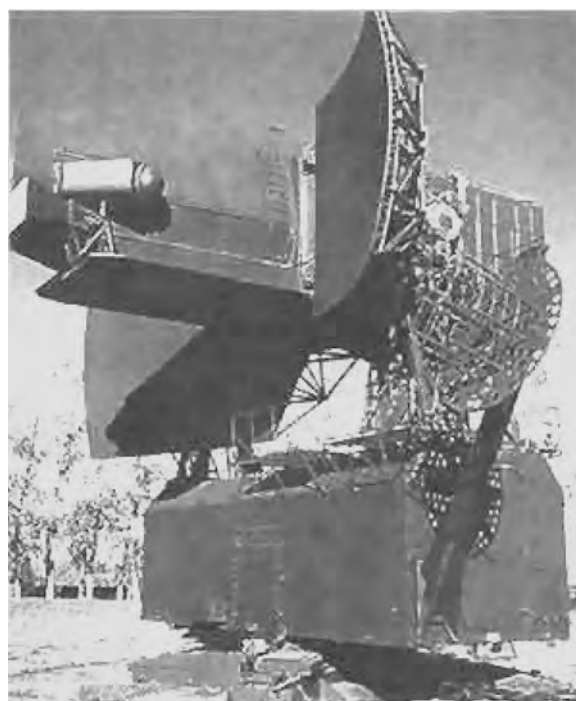


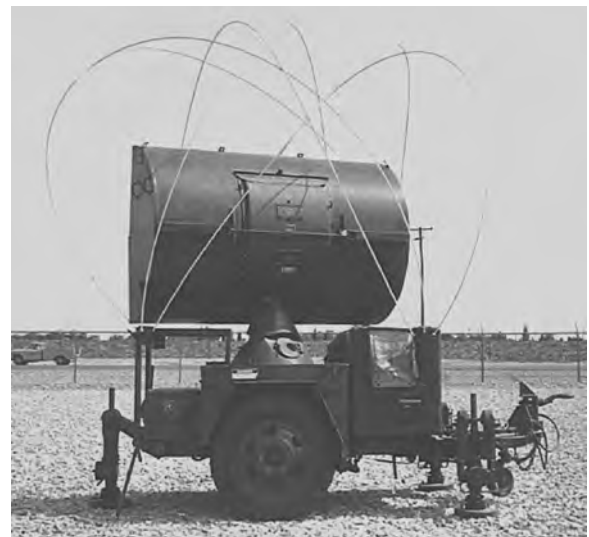
Рис. 198, а



**Рис. 199**



**Рис. 200**



**Рис. 202**



**Рис. 201**



**Рис. 203**

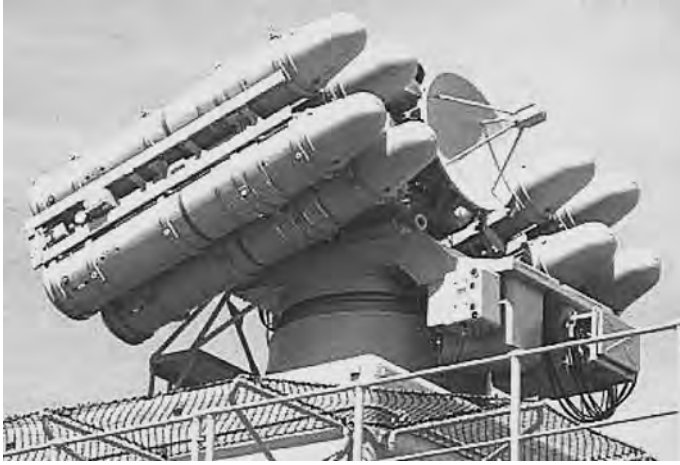


Рис. 204



Рис. 205



Рис. 206

Французский корабельный зенитно-ракетный комплекс "Crotale Noval" является вариантом ЗРК "Crotale", смонтированного на самоходной установке. Общий вид "Crotale Noval" представлен на рис. 204. Этот комплекс предназначен для обороны от самолетов и противокорабельных ракет, летящих на высотах 4—4000 м. Антенна, расположенная на пусковой установке, стабилизирована в двух плоскостях. Через 6 секунд после передачи цели на сопровождение возможен пуск ракет.

Наземный вариант показан на рис. 205, в том числе вместе с радиолокационным дальномером. Модификация "Crotale-NG" может вести боевые действия в движении.

Итальянский корабельный ЗРК "Albatros-Aspide" — ракетный комплекс ближнего радиуса действия, предназначенный для обороны надводных кораблей от низколетящих маневрирующих противокорабельных ракет, самолетов и вертолетов. Система управления огнем с, по-видимому, двухзеркальной антенной (рис. 206). РЛС обнаружения и сопровождения (рис. 207) содержит типичную для таких целей антенну с веерным лучом.

Немецкий ЗРК "Roland" — чисто ракетный автономный комплекс (рис. 208) довольно обычной комплектации с РЛС обнаружения и РЛС управления огнем, по-видимому, с двухзеркальной антенной.

Интересен зенитный комплекс немецкой армии "Gerard" (см. рис. 209 и 210), вооруженный двумя 35-мм автоматическими пушками. Комплекс оснащен двумя РЛС — целеуказания, расположенной в задней части башни, и орудийной наводки, расположенной спереди. Такая компо-



Рис. 207

новка антенн стала традиционной для автономных ЗРК. Нельзя не отметить, что в конструктивном отношении "Gepard" поражает воображение своей почти идеальной законченностью каждого видимого элемента корпуса: можно подумать, что это не боевая техника, а какой-нибудь автомобиль экстра-класса.

Подводя итог приведенному обзору радиолокационных комплексов, можно с очевидностью отметить, что большинство из них оснащено зеркальными антеннами практически таких же типов, как и российские ЗРК и по внешнему виду от них ничем не отличаются. Одним словом, у нас в данном вопросе все как у людей!

Для полноты коллекции зеркальных антенн нельзя не отметить достаточно необычную и достаточно оригинальную антенну метеонавигационного радиолокатора "Гроза", которая устанавливается под носовым обтекателем большинства гражданских самолетов. Это почетное место свидетельствует о важности тех задач, которые призвана решать данная РЛС. Ее назначение — обнаружение находящихся в передней полусфере опасных для полета зон активной грозовой деятельности и мощной кучевой облачности с повышенной турбулентностью и определение их полярных координат; получение радиолокационной карты земной поверхности для облегчения ориентации экипажа по характерным земным ориентирам; обнаружение горных массивов и отдельных горных вершин. Соответственно антенна в 3,2-см диапазоне в режиме обнаружения опасных гидрометеобразований (режим "Метео") формирует узкий луч "карандашной" формы. В режиме обзора земной поверхности (режим "Земля") используется косекансный луч. Переход от одного типа ДН к другому осуществляется за счет смены поляризации поля.

Для обзора земной поверхности, в целях повышения дальностей наблюдения средних промышленных центров, используются поочередно два вида диаграмм направленности, переключаемых автоматически. При движении рефлектора вправо формируется узкая диаграмма направленности "карандашного" типа. За счет большого послесвечения экрана индикатора радиолокационные изображения от узкого и веерного лучей воспринимаются оператором как единое целое.

Получение с помощью одной антенной системы двух различных форм диаграммы направленности осуществляется следующим образом.

Сдвоенный отражатель антенны состоит из симметричного параболического отражателя и отражателя специальной формы, вы-



Рис. 208



Рис. 209



Рис. 210

полненного в виде "козырька" в верхней части параболоида.

Параболический отражатель при облучении его электромагнитной энергией формирует диаграмму направленности в виде узкого луча "карандашного" типа. Он изготовлен из полностью металлизированной стеклоткани.

Профиль отражающей поверхности отражателя специальной формы рассчитан из условия получения в вертикальной плоскости косекансной диаграммы направленности. Этот отражатель представляет собой поверхность двойной кривизны, выполненной из металлизированной стеклоткани, металлизированные нити которой расположены строго горизонтально и имеют шаг 3 мм. Оба отражателя жестко соединены между собой и установлены на металлический штампованный держатель чашеобразной формы. Отражатель специальной формы размещается перед симметричным параболическим отражателем и закрывает только верхнюю его часть, образуя тем самым своеобразный "козырек" антенного рефлектора.

Формирование соответствующей диаграммы направленности осуществляется изменением плоскости поляризации излучаемых высокочастотных колебаний.

При вертикальной поляризации облучающая электромагнитная энергия беспрепятственно проходит сквозь отражатель специальной формы с горизонтальным расположением металлизированных нитей и отражается от симметричного параболоида. При этом формируется диаграмма направленности в виде узкого луча. При изменении поляризации облучающих колебаний на горизонтальную происходит отражение от являющегося для данной поляризации непрозрачным отражателя специальной формы и формируется веерная диаграмма направленности косекансного типа.

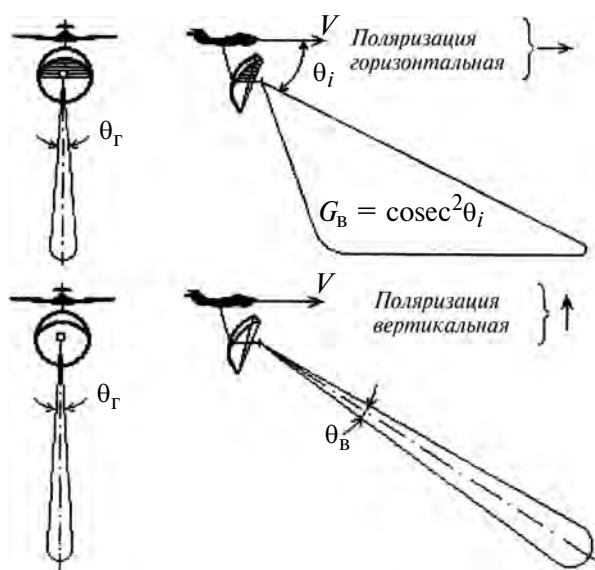


Рис. 211

Принцип получения веерной и игольчатой диаграмм направленности при смене поляризации

На рис. 211 приведены диаграммы направленности в двух плоскостях для обоих режимов работы антенны.

Для поворота плоскости поляризации излучаемых высокочастотных колебаний на  $90^\circ$ , необходимого для изменения формы диаграммы направленности с узкого луча на веерный, в РЛС "Гроза" применен ферритовый вращатель. Ферритовый стержень вращателя установлен на фторопластовой втулке внутри круглого волновода. Вдоль оси феррита действует постоянное магнитное поле, создаваемое электромагнитом, размещенным на волноводе. Угол поворота плоскости поляризации зависит от величины и направленности этого поля, которые устанавливаются с помощью реле изменения поляризации при смене режима работы станции.

В режиме "Земля" (масштабы развертки "30", "50" и "125") на катушку реле подается напряжение от борсети +27 В. Реле при этом срабатывает и через замкнувшиеся контакты обеспечивает питание электромагнита постоянным током такой величины и направления, которые обеспечивают получение горизонтальной поляризации излучаемой энергии и, тем самым, формирование веерной диаграммы направленности. В режиме "Земля" при масштабе развертки "375" катушка реле обесточена. При этом поляризация излучения — вертикальная и антенной формируется узкий луч.

При развертке "250" и работе РЛС в режиме "Земля" питание на катушку реле подается непрерывно, а через контакты кулачкового механизма выключателя. Кулачок механизма связан с азимутальной осью антенны и обеспечивает замыкание контакта механизма при движении рефлектора в одну сторону и его размыкания при движении в противоположном направлении. За счет этого на развертке обеспечивается черастактный обзор земной поверхности узким и веерным лучом.

При работе РЛС в режиме "Метео" обеспечивается получение на индикаторе в полярных координатах "азимут—дальность" радиолокационного изображения воздушной обстановки в пространстве, ограниченном азимутальными углами  $\pm 100^\circ$  относительно строительной оси самолета и углами места  $\pm(1,5-2^\circ)$  относительно плоскости горизонта. Для того чтобы сектор обзора не изменял своего положения в пространстве при кренах и тангаже самолета, что особенно важно при обходе грозных зон, ось диаграммы направленности антенны гиросtabilизирована. При необходимости обзора пространства под другими углами места диаграмма направленности антенны может быть наклонена вручную относительно плоскости горизонта на угол  $\pm 10^\circ$ . В режиме работы "Метео" обзор пространства осуществляется РЛС с помощью симметричной узкой диаграммы направленности, получаемой в антенне при вертикальной поляризации излучаемых колебаний.

## ЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ В КОСМИЧЕСКИХ ПРОЕКТАХ

---

Спутники связи буквально опутывают мир невидимыми нитями. Если их разорвать, многие отрасли хозяйства не смогут развиваться. Три спутника, находящихся на стационарной орбите, обеспечивают радиовидимость большей части поверхности Земли.

С развитием и совершенствованием систем спутниковой связи возникла необходимость повышения эффективности спутников-ретрансляторов. Один из путей повышения эффективности этих систем — применение на спутниках многолучевых узконаправленных антенн, которые позволяют существенно повысить энергетический потенциал радиолиний, а также улучшить использование радиочастотного спектра за счет пространственной селекции.

На первых ИСЗ использовались слабонаправленные, биконические и другие малогабаритные антенны. Из-за невысокой мощности таких ИСЗ наземные станции оснащались крупными антеннами, компенсирующими недостаток усиления бортовых антенн. По мере развития технических средств растут габариты и масса спутников. С увеличением общих размеров ИСЗ появилась возможность использовать направленные антенны. На ИСЗ INTELSAT-IV была установлена антенная система, обеспечивающая формирование узконаправленных и глобальных лучей, охватывающих всю видимую с ИСЗ часть поверхности Земли. Антенны ИСЗ INTELSAT-IVA формировали несколько лучей, создающих ДН сложной формы, которые охватывали лишь заданные области поверхности земного шара, что позволило экономить энергию бортовых источников электропитания. На ИСЗ INTELSAT-V применена многолучевая антенная система в диапазоне 4/6 и 11/14 ГГц, формирующая лучи, перекрывающие полусферу Земли, и сеть узких лучей шириной по  $2^\circ$ . Многолучевая антенная система ИСЗ INTELSAT-V обеспечивает повторное использование рабочих частот посредством разделения сигналов по поляризации и пространственного разнесения лучей, что позволило увеличить пропускную способность ИСЗ в два раза по сравнению с ИСЗ INTELSAT-IVA. Применение в системах спутниковой связи бортовых многолучевых антенн позволяет увеличить пропускную способность благодаря многократному использованию частотного диапазона за счет пространственного разделения и разделения по

поляризации, позволяет снизить мощность передатчиков ИСЗ и земных станций, уменьшить диаметр их антенн. Применительно к системам, обслуживающим мобильные объекты, многолучевые антенны дают возможность значительно снизить стоимость оконечного оборудования пользователей. Применение многолучевых антенн допускает многоцелевое использование ИСЗ благодаря возможности маневрирования лучами многолучевой антенны.

В зависимости от конкретных задач, выполняемых той или иной системой спутников связи, возможны различные варианты применения многолучевых антенн. Например, узкие лучи могут использоваться следующим образом для повышения энергетического потенциала радиолинии: 1) в отдельных разнесенных районах; 2) в широком районе обслуживания путем формирования узких соприкасающихся лучей; 3) в отдельных разнесенных районах с одновременной возможностью повторного использования частотного спектра в разных районах; 4) в широком районе обслуживания путем формирования узких соприкасающихся лучей с возможностью повторного использования частотного спектра в отдельных случаях.

При проектировании конкретной антенной системы необходимо учитывать вариант применения многолучевых антенн: так, в первом варианте антенна должна обеспечивать формирование отдельных неподвижных или сканирующих не связанных между собой лучей без особых требований к уровню боковых лепестков; во втором — системы узких лучей с пересечением парциальных ДН на уровне 3 дБ; в третьем — отдельных неподвижных или сканирующих лучей с уровнем боковых лепестков, не превышающим —  $25\div 30$  дБ; в четвертом — ряда неподвижных узких лучей с пересечением парциальных ДН на высоком уровне и уровнями боковых лепестков, не превышающими —  $25\div 30$  дБ. Требования к пересечению парциальных ДН на уровне — 3 дБ в зоне обслуживания являются общепринятыми, а требования к уровню боковых лепестков для возможности повторного использования спектра получаются из расчетов, например, по методике приложения 29 Регламента радиосвязи.

Многолучевая антенна с узкими парциальными ДН может эффективно использоваться для создания контурных лучей, особенно в тех слу-

чаях, когда возникает необходимость перестраивать форму контурного луча. Разновидностью такой антенны может быть антенна с подавлением помехи путем формирования глубоких нулей в ДН в направлении прихода помехи.

В некоторых случаях многолучевая антенна должна компенсировать перемещение спутника относительно Земли, обеспечивая непрерывность связи. В этом случае коммутационная по своей природе антенна должна обеспечивать "плавное" движение луча.

Используя принцип поляризационной или частотной развязки, можно создавать многофункциональную антенну, которая, например, может создавать узкий сканирующий луч на фоне широкого неподвижного луча.

В последнее время начинает все более широко применяться космическая радиолокация. В этом случае особенно перспективными оказываются зеркальные многолучевые антенны большого диаметра, формирующие веер очень узких лучей в заданном угловом секторе, который может содержать десятки таких парциальных лучей. Достоинством зеркальных антенн в данном случае является, то, что они, в отличие от фазированных решеток, могут выполняться в виде складывающейся конструкции, которая после вывода на орбиту может развертываться и принимать необходимую форму.

Другим перспективным направлением является разработка крупных земных антенн в системах спутниковой связи со сканированием в ограниченном секторе углов. Эти антенны могут использоваться для поиска и слежения за ИСЗ, который находится на стационарной орбите, но совершает небольшие эволюции относительно некоторого среднего положения. Далее, одна антенна может обеспечивать одновременную связь с несколькими разнесенными спутниками на стационарной орбите.

Все эти задачи могут успешно решаться с помощью зеркальных антенн.

В ближайшее десятилетие количество спутников на стационарной орбите может достичь сотни, причем их расположение по орбите далеко не равномерно и все более ощутимой становится проблема взаимных помех, которая может быть разрешена только за счет применения все более совершенных антенных систем как на борту, так и в земных станциях. Создание таких антенн невозможно без использования новейших технологий и решения целого ряда сложнейших теоретических проблем как чисто антенного плана, так и проблем, связанных с функционированием систем в целом: многостанционный доступ, взаимные помехи, надежность, экономическая эффективность и возможность реализации требуемого трафика в условиях все возрастающего потока информации с учетом возможностей всех элементов антенных систем.

Антенны и диаграммо-образующие устройства становятся ключевым элементом на пути создания высокоэффективных систем спутниковой связи в ближайшие годы.

Спецификой антенн спутниковой связи является то, что они обычно бывают многолучевыми или сканирующими, но лучи формируются или сканируют в сравнительно узком угловом секторе — в пределах глобального угла. В этом угловом секторе укладывается порядка 2-х-3-х десятков лучей. Поэтому нецелесообразно использовать фазированные антенные решетки с заполнением всей апертуры излучающими элементами, устраивать систему запитки, коммутации и диаграммо-образующую систему, имеющих в некоторых случаях несколько входов по числу независимых лучей. Немаловажным фактором является специфика работы антенны в условиях космического пространства — экстремальные температуры, радиация, невозможность регламентных работ и т. д. В этих условиях гораздо более практичными оказываются зеркальные антенны, большая часть апертуры которых является пассивным металлом, а активным элементом является небольшая решетка облучателей.

Неотъемлемой частью профессиональных систем спутниковой связи являются большие зеркальные антенны (БЗА), которые обеспечивают передачу и прием крупных объемов информации как вместе со спутниками на стационарной орбите, так и на других орбитах. Вместе с тем БЗА обеспечивают связь с космическими станциями, спускаемыми аппаратами и аппаратами в дальнем космосе. Поэтому к БЗА предъявляются все более разнообразные требования, и количество БЗА во всем мире непрерывно возрастает. Теперь уже недостаточно использовать простейшие параболические антенны (ПА).

Дальнейшее развитие БЗА и, в частности, ПА связано не только с увеличением их размеров и точности, но и с возрастающей потребностью в многолучевых БЗА с управляемыми лучами и быстро сканирующих БЗА с расширенным сектором обзора. Для ПА также стоят задачи экономического достижения еще более высоких энергетических показателей при освоении новых участков сантиметрового и миллиметрового диапазонов, а также дальнейшего развития многоканальных высокоэффективных режимов работы, создание приемопередающих СВЧ трактов со сверхмалыми потерями, совершенствования оборудования зеркальных антенных систем путем структурной и параметрической оптимизации.

**Широкоугольное сканирование и многолучевой режим.** Как известно, возможности сканирования в обычных ПА ограничиваются сектором в несколько единиц ширины луча. За пределами этого сектора возникают существенные потери формы ДН и эффективности антенны, пропор-



циональные примерно четвертой степени относительного отклонения луча.

Большие зеркальные антенны с увеличенным сектором сканирования луча позволяют, сохраняя преимущества зеркальных антенн, такие как высокая эффективность и простота, получить новые качества — быстрый обзор и многолучевую работу в секторе, в десятки и сотни раз превышающем ширину луча. Конечно, по возможностям сканирования зеркальные антенны не могут конкурировать с ФАР. Однако в тех случаях, когда указанного расширения сектора достаточно, сканирующая БЗА является оптимальным вариантом.

При использовании в качестве облучателей зеркальных антенн относительно небольших и не слишком сложных ФАР такие антенны приобретают гибридные свойства и поэтому называются гибридными зеркальными антеннами (ГЗА).

Для эффективного расширения сектора быстрого и независимого сканирования ряда лучей в БЗА необходимо выполнение двух условий: получение малых aberrаций или фазовых искажений в ЗС для заданного сектора сканирования и динамичное управление центрами излучения, направлением максимумов ДН облучателя, а при необходимости и его фазовой характеристикой или формой поверхности, на которой расположены излучатели.

Для снижения уровня суммарных aberrаций в заданном двумерном секторе сканирования используется подбор количества, формы и расположения зеркал, а при необходимости и линз, а также реализация необходимого амплитудно-фазового распределения (АФР) поля в облучателе. При этом граничными условиями являются допустимые размеры каустики, определяющей габариты облучателя, допустимое затенение зеркал и снижение коэффициента использования габаритных размеров ЗС. Предельные характеристики таких зеркальных антенн [электрические размеры апертуры, ширина сектора сканирования, снижение коэффициента усиления (КУ), повышение уровня боковых лепестков (УБЛ), другие искажения формы ДН], особенно с двумерным сканированием, исследованы еще недостаточно. Не выработались эффективные инженерные методы синтеза схем ЗС и расчета таких антенн с наперед заданными радиотехническими и конструктивными характеристиками.

В настоящее время основной путь построения формы ЗС сканирующих БЗА связан с численными методами на основе многопараметрического перебора на ЭВМ в пределах указанных выше степеней свободы в виде варьируемых параметров зеркальной и облучающей систем. Первым шагом на этом пути является выбор прототипа антенны требуемых размеров с определенным первоначальным числом степеней свободы. Достаточность числа степеней свободы для решения задачи проверяется в процессе расчета. Построе-

ние прототипа наиболее целесообразно с использованием различных средств, хотя бы частично снижающих и стабилизирующих aberrации в ЗС в секторе сканирования: в частности, это построение бифокальных, полифокальных, апланатических, сферических форм и сечений ЗС.

Затем по алгоритмам динамического программирования прототип оптимизируется по критериям минимума и равномерности потерь КУ или увеличения УБЛ в заданном секторе сканирования, либо по критерию максимума ширины сектора сканирования при заданном допустимом снижении КУ или увеличении УБЛ.

Расширение сектора сканирования БЗА неизбежно ведет к увеличению габаритов облучателя и промежуточных зеркал. Поэтому возникает задача ограничения затенения в таких антеннах. Наиболее эффективным средством для этого является использование несимметричных ЗС, в частности с решетчатыми промежуточными зеркалами и главным зеркалом с преобразованием поляризации. Однако зеркальные антенны с решетчатыми промежуточными зеркалами эффективны лишь при работе только на одной неизменной поляризации. Одним из возможных вариантов несимметричной антенны со сплошными зеркалами является антенна типа "раковина".

Для малошумящих приемных сканирующих БЗА с облучателями в виде ФАР важно сохранить достаточно низкое значение шумовой температуры СВЧ тракта антенны на уровне, соизмеримом с составляющими  $T_{ш}$  антенны и малошумящего усилителя (МШУ). Наиболее эффективный путь решения этой задачи — использование ФАР с активными элементами решетки.

Для многих типов БЗА приобретает возрастающее значение их максимальная пространственная избирательность в условиях воздействия внешних шумов и промышленных помех, как один из элементов электромагнитной совместимости и помехоустойчивости наряду с частотной избирательностью и другими видами защиты. Уровень боковых лепестков ДН может ограничиваться до необходимых пределов во всех направлениях, в заданных секторах пространства либо в отдельных направлениях.

Характерно, что для практических целей обычно не требуется детальный расчет всей мелко-масштабной многолепестковой пространственной структуры бокового излучения, да и достоверность такого расчета для многих конкретных конструкций оказывается невысокой. Так, для оценки помехозащищенности антенны и расчета их шумовой температуры достаточно ограничиться средне- и крупномасштабными данными об огибающей или среднем уровне КНД бокового излучения. При этом допустимо просуммировать некоррелированные парциальные диаграммы рассеяния от различных факторов по их среднему уровню мощности.

Для БЗА известны и широко используются общие принципы подавления рассеянных полей, связанные с вызывающими их двумя группами конкретных факторов: векторное апертурное распределение поля и дифракционное рассеяние зеркал, затеняющих конструкций и облучателя. Кроме того, для создания провалов в результирующей ДН антенны специально в направлениях помех используются методы адаптации, которые сводятся к автоматическому управлению амплитудой и фазой возбуждения элементов сложных облучателей и дополнительных элементов БЗА.

Оптимальная функция апертурного распределения для заданных требований наиболее рационально определяется методами синтеза. При этом характерно, что в многозеркальных БЗА сантиметрового и миллиметрового диапазонов профиль вторичных и главного зеркал при необходимости учитывает их расположение в промежуточной зоне первичного направленного облучателя.

Для количественной оценки рассеянных полей, связанных с конечным значением допусков в апертурном амплитудно-фазовом распределении, используют методы статистической теории антенн. Задачу подавления кроссполяризованного рассеяния в осесимметричных БЗА до уровня парциального коэффициента рассеяния около 1 % успешно решает применение так называемых *скаляризованных облучателей*, обладающих достаточным постоянством поляризационной характеристики в пределах сектора облучения. Задача глубокого подавления кроссполяризованного излучения особенно актуальна при поляризационном разделении двух каналов в БЗА спутниковой связи с требуемой развязкой до 25...35 дБ или при высокоточных поляризационных радиофизических и радиоастрономических измерениях.

Дифракционное рассеяние на зеркалах обусловлено излучением их возбужденной кромочной зоны и в значительной мере сосредоточено в довольно узких воронкообразных кромочных лепестках, сориентированных в направлении границ света и тени в ДН облучения зеркал. В настоящее время расчеты ДН рассеянных полей больших радиозеркал на основе методов физической оптики и краевых волн достаточно развиты для решения практических задач и обеспечивают необходимую точность, часто уже в первом приближении. Основное средство подавления рассеянных полей зеркал состоит в снижении уровня облучения их кромочных зон, в том числе использованием дополнительных экранов на кромках зеркал (бленд), отодвигающих кромку в слабо освещенную зону. Такие экраны могут быть достаточно легкими, поскольку к ним не предъявляются те же требования по точности, что и к основным зеркалам.

Уменьшение рассеяния облучателя связано с более полным использованием главного лепестка его ДН и подавлением в ней боковых и задних лепестков. Первая задача требует симметричной, гладкой и стабильной амплитудно-фазовой и поляризационной характеристик излучения практически в пределах всего главного лепестка. При этом более полное использование главного лепестка ДН облучателя увеличивает перепад амплитуд в пределах сектора облучения и, как следствие, увеличивает коррекцию профиля зеркал ПА, необходимую для получения заданного амплитудного распределения в апертуре. В частности, рупорные облучатели с импедансными стенками имеют определенные преимущества в отношении указанных характеристик излучения и способны обеспечить парциальный коэффициент рассеяния приблизительно 2...3 %.

Уровень рассеянных полей, вызванных затенением, зависит от эффективного поперечника рассеяния затеняющих конструкций, т. е. от их поперечных размеров и степени радиопрозрачности. Наименьшее затенение реализуется при использовании ажурных ферменных или стержневых металлических опор либо диэлектрических опор в виде стержней или конических оболочек, сечение которых предельно ограничивается допустимой жесткостью опор в условиях эксплуатации.

Для уменьшения рассеяния от затенения апертуры контррефлектором применяют главное зеркало с кольцевым фокусом, имеющее мертвую необлучаемую зону в центре апертуры по диаметру не меньше контррефлектора.

При облучении контррефлектора облучателями с относительно большой апертурой может возникнуть затенение центральной зоны апертуры не только контррефлектором, но и облучателем. Устранить его можно, применяя обращенный ход лучей, когда центральные лучи облучателя отбрасываются на периферию главного зеркала, а периферические — на его центральную часть. Парциальный коэффициент рассеяния в больших осесимметричных ПА с учетом всех факторов затенения может составлять приблизительно 4...5 %.

Диапазонность антенны ограничивается двумя основными ее элементами: ЗС и облучающей системой (ОС). Для ЗС ограничения со стороны длинных волн определяются размером наименьшего из зеркал  $D_M$ , исходя из соотношения  $\lambda_{\max} \approx D_M/(10...20)$ , а со стороны коротких волн — суммарным среднеквадратическим отклонением (СКО)  $\sigma$  формы ЗС от теоретической, исходя из соотношения  $\lambda_{\min} \approx (25...50)\sigma$ . При указанных критериях ЗС широко применяемых ПА имеют перекрытие по частоте ~5—10, а их уникальные высокоточные крупные образцы до 100.

Более жесткие ограничения на диапазонность БЗА накладывают облучатели, частотное пере-

крытие которых в одноканальном режиме при высокоэффективной работе составляет в среднем не более 1,5...2.

Для оценки предельно короткой длины волны БЗА используются два основных критерия. Один из них определяется допустимым снижением КНД антенны на 0,5...2 дБ под влиянием суммарных фазовых искажений в антенне. Другой — таким же снижением КНД в направлении на объект вследствие отклонения луча антенны на величину максимальной (условно с вероятностью приблизительно 0,95) ошибки системы на-

ведения  $\Delta\theta_{\max} = \sqrt{\Delta\alpha^2 \cos^2\beta + \Delta\beta^2}$ , где  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\beta$  — азимутальная и угломестная составляющие погрешности, а  $\beta$  — угол места. Комплексный критерий соответствует одновременному и примерно равному вкладу обоих критериев, соответствующих  $\lambda_{\text{пред}} \approx (26...13)\delta \approx (50...25)\sigma$ . При этом между фазовыми искажениями и погрешностями системы наведения выполняется соотношение  $8\sigma/D \approx \Delta\theta_{\max} \approx (0,18...0,35)2\theta_{0,5}$ .

Для БЗА со сверхбольшими размерами (более 50...100 м) при работе в зоне низких углов места приблизительно  $< 10^\circ$  в сантиметровом и миллиметровом диапазонах возникают дополнительные частотные ограничения, обусловленные турбулентностью приземного слоя атмосферы, которая проявляется в виде фазовых искажений и перекоса волнового фронта в апертуре антенны. Так, для средних атмосферных условий при эффективной длине трассы около 90 км и дисперсии коэффициента преломления, приблизительно равной  $0,15 \cdot 10^{-3}$ , среднеквадратическая геометрическая погрешность достигает приблизительно 1 мм при радиусе корреляции 50...60 м.

Экономическая необходимость наиболее полного универсального использования дорогостоящих образцов БЗА требует в ряде случаев одновременной или поочередной работы в одной антенне нескольких приемных и передающих каналов, разделенных по частоте, а также по поляризации. Один из путей решения этой задачи состоит в расширении полосы частот облучателей, соединяемых с многоканальными приемопередатчиками через мультиплексоры.

Другой путь связан с конструктивным совмещением развязанных облучателей различных частотных каналов. Еще один вариант сводится к применению схем и конструкций БЗА, обеспечивающих оперативную многократную смену облучателей различных диапазонов.

Основой для построения облучателей в составе высокоэффективных БЗА являются *скаляризованные облучатели* рупорного типа. Расширение диапазона частот таких облучателей связано прежде всего с оптимизацией частотной характеристики устройств, обеспечивающих скаляризованную ДН, в частности неоднородной импедансной структуры на всей внутренней поверхности

рупоров от раскрытия до горла, канавкам которой может быть придана специальная форма.

Для эффективного совмещения облучателей различных диапазонов, как это следует из теории фокального синтеза, должно обеспечиваться достаточно хорошее соответствие между размерами и заполнением фокального пятна и апертурным распределением поля в облучателях каждого диапазона. Необходимая частотная зависимость размера апертуры в комбинированном облучателе при соосном размещении облучателей отдельных диапазонов может быть получена введением пространственной или трактовой связи между ними с требуемой частотной зависимостью. Для работы облучателя самого высокочастотного диапазона такой связи практически не требуется, и паразитного возникновения связи нетрудно избежать в обычном рупорном облучателе. В то же время для эффективной работы низкочастотных каналов необходимо ввести частотно-избирательную связь с высокочастотным облучателем, заполняющим центральную часть апертуры. При четырех-пяти и более кратных разносах частот ценой некоторых потерь можно отказаться от связи между такими облучателями.

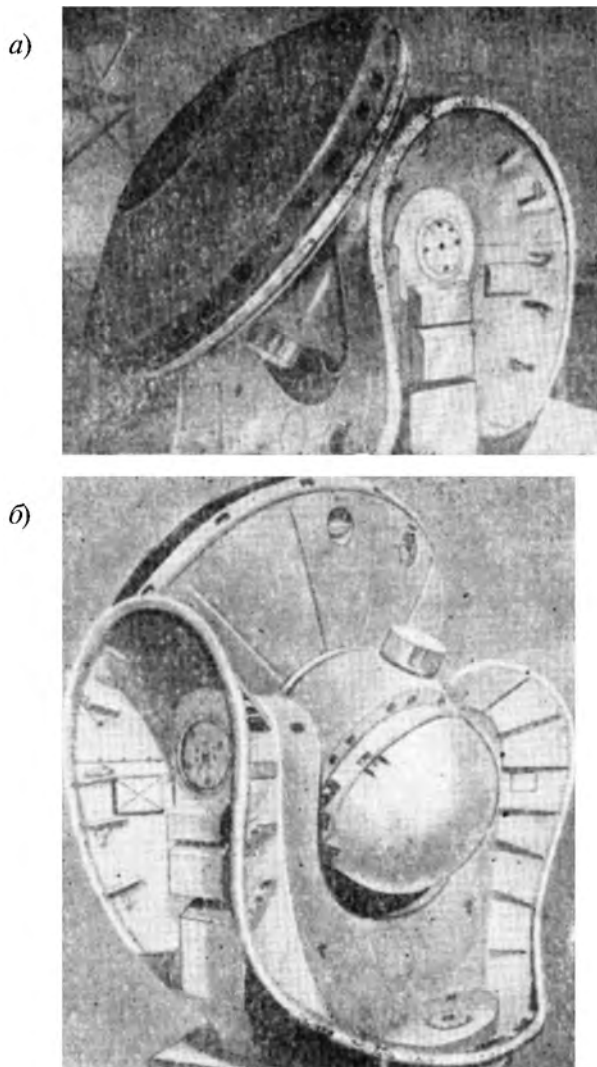
Типичными вариантами реализации совмещенных облучателей являются: соосные рупоры, которые при необходимости имеют между собой частотно-избирательную связь через стенки внутреннего рупора, или соосные рупорная и диэлектрическая антенны при необходимой частотной зависимости степени концентрации поля в поперечном сечении последней, или соосные рупор и плоская малоэлементная синфазная решетка со свободным центром и др.

Известен также метод совмещения диапазонов на основе использования частотно- и поляризационно-избирательных промежуточных зеркал в ЗС. Применение многослойной структуры частотно-избирательных зеркал позволяет оптимизировать их частотные характеристики.

Для оперативной смены диапазонов при их поочередной работе необходима автоматизированная перестановка облучателей и переключение их трактов либо переключение потока электромагнитной энергии от главного зеркала к набору неподвижно закрепленных облучателей с помощью управляемых промежуточных зеркал.

В радиосистемах с БЗА, работающих при недостаточной точности программных данных о движении объектов связи и наблюдения или в отсутствие таких данных, необходимо использовать режим автосопровождения (АС) по принимаемому радиосигналу. Такая же необходимость возникает в БЗА, устанавливаемых на морских кораблях при ограничениях точности стабилизации. Методы построения облучателей для таких антенн известны давно.

Формирование равносигнальной зоны в БЗА осуществляется моноимпульсными методами, ме-



**Рис. 212**  
**Антенна системы точного наведения:**  
а) вид спереди, б) сзади

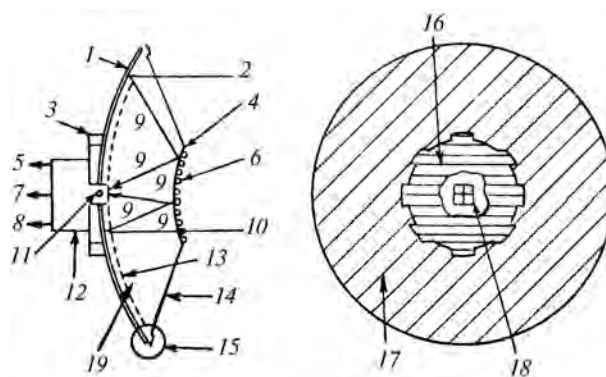
годами электрического дискретного (четырёх- или восьмипозиционного) сканирования или экстремальными методами. В радиосистемах связного и информационного типов от следящих антенн требуется лишь заданная эффективность в направлении на объект с допустимым ее парциальным снижением за счет элементов системы автосопровождения на доли децибела. Такое снижение эффективности соответствует угловой погрешности, приблизительно равной  $2\theta_{0,5}/(5...7)$ , и может быть обеспечено системами автосопровождения с пониженной крутизной пеленгационной характеристики. Это позволяет уменьшить связь суммарного канала АФУ с его боковыми или разностными каналами, благодаря чему вносимые ими в основной (информационный, дальномерный) высокочувствительный тракт потери и шумовая температура незначительны.

Для формирования пеленгационной характеристики моноимпульсных и сканирующих антенн могут быть использованы многоэлемент-

ные или многомодовые облучатели. Выбор типа облучателя определяется требованиями к его широкополосности, качеству и идентичности поляризационных характеристик для всех каналов облучателя и к его собственному коэффициенту рассеяния. Многоэлементные облучатели более диапазонны и имеют лучшие поляризационные характеристики, но обладают большим рассеянием. Для экстремального автосопровождения вообще не требуется многоканальных облучателей и сканеров, поскольку пеленгационная характеристика формируется непосредственно в системе наведения.

Изменения частоты и поляризационной характеристики принимаемого сигнала вызывают искажения пеленгационных характеристик антенны в виде смещения нулевого направления, изменения крутизны, нарушения ортогональности азимутальной и угломестной плоскостей пеленгации и появления связи между сигналами рассогласования в обоих угловых каналах слежения. Указанные явления снижают точность и устойчивость автосопровождения. Для ослабления этих эффектов необходимы частотная и поляризационная стабилизации поперечного положения фазовых центров основного и боковых или разностных каналов, а также высокая идентичность поляризационных характеристик всех каналов облучателя в диапазоне частот. На рис. 212 показана антенная система точного наведения, а на рис. 213 схема используемой антенны.

При построении качественных АФУ БЗА для автосопровождения основное значение имеет создание достаточно совершенных широкополос-



**Рис. 213**  
**Электрическая схема антенны**  
**системы точного наведения:**

1 — основное параболическое зеркало; 2 — вертикально поляризованный сигнал; 3 — опорное кольцо;  
4 — гиперболическое малое зеркало; 5 — суммарный сигнал; 6 — горизонтальная решетка; 7 — азимутальный разностный сигнал; 8 — угломестный разностный сигнал;  
9 — горизонтальная поляризация; 10 — вертикально поляризованный сигнал; 11 — фокус; 12 — компаратор;  
13 — сетка, наклоненная на 45°; 14 — радиопрозрачная опора; 15 — решетка и основное зеркало поворачивают поляризацию на 90°; 16 — горизонтальная решетка на малом зеркале; 17 — решетка, наклоненная на 45°;  
18 — облучатели; 19 — вертикальная поляризация



Рис. 214

ных мостовых схем, СВЧ коммутаторов, управляемых фазовращателей, активных и других элементов СВЧ тракта.

В случае большого объема приемопередающего оборудования и ограниченных размеров антенны аппаратуру приходится устанавливать в отдельном помещении или в контейнерах вне антенны и прокладывать к ней достаточно длинный СВЧ тракт. Если для дециметрового и части сантиметрового диапазонов такое решение может быть в ряде случаев допустимым, то для более коротковолновых диапазонов длинные тракты требуют кардинального снижения погонных потерь.

Обычные волноводы независимо от выбора типа волны для решения этой задачи практически мало пригодны. Можно указать лишь на варианты СВЧ тракта увеличенного сечения с фильтрами высших волн, возможно, с принудительным охлаждением, например с помощью криоэлектронных элементов. Более подходящим типом СВЧ тракта с низким уровнем потерь в высокочастотных диапазонах для БЗА являются лучеводы, представляющие собой экранированные квазиоптические системы СВЧ передачи перископического типа. Волны поворачивают и фокусируют с помощью ряда зеркал, в общем случае имеющих профиль какого-либо конического сечения в зависимости от оптической схемы передачи.

Большие зеркальные антенны в системах спутниковой связи отличаются чрезвычайной конструктивной сложностью, но сама по себе антенная часть достаточно тривиальна и зеркала

отличаются только размерами раскрытия. И к тому же их фотографии весьма часто публикуются в печати. Исключение составляет только антенна офсетного типа в Гринбэнк (рис. 214). Поэтому мы обратимся к рассмотрению антенн самих спутников связи.

Проследим теперь основные этапы развития антенной техники применительно к спутникам связи.

Первым связным спутником, который был оборудован достаточно простым вариантом зеркальной антенны был ИСЗ Intelsat III с зеркально-рупорной антенной — вариантом рупорно-параболической антенны. Антенная система спутника ATS-II состоит из 2-х антенн, каждая из которых имеет вид параболического цилиндра, который облучается линейной вибраторной решеткой.

На спутнике стратегической системы связи министерства обороны США DSCS-II (рис. 215) установлены две параболические антенны. Каждая параболическая антенна устанавливается на опорно-поворотном устройстве с двумя степенями свободы, с помощью которого осуществляется сканирование земной поверхности остро-направленным лучом антенны шириной 2,5°. Диаметр зоны обзора каждого луча равен примерно 1650 км.

На уникальном спутнике ATS-6 установлена антенна диаметром 9 м (рис. 216), относящаяся

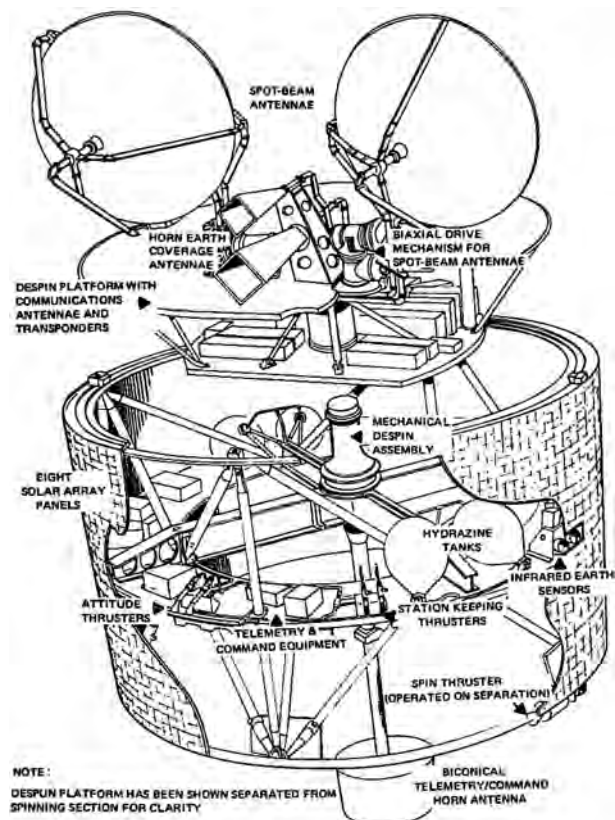


Fig 1.04 The DSCS II Satellite

Рис. 215

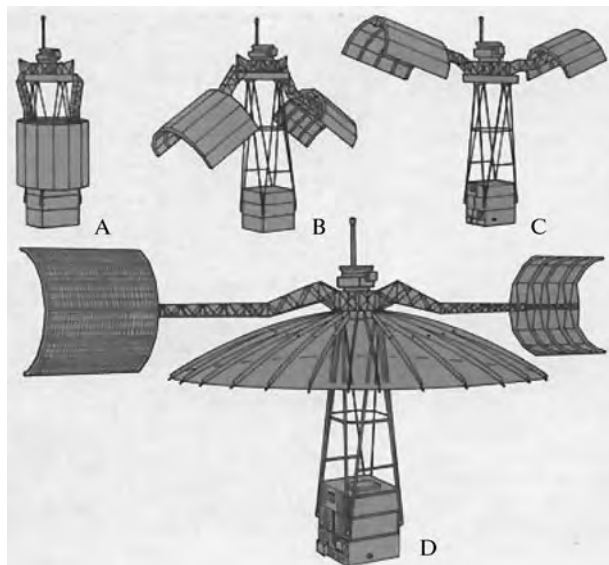


Рис. 216

к классу многолучевых многочастотных антенн. Естественно, что такая антенна не может быть доставлена на орбиту при таком диаметре, поэтому она первоначально находится в сложенном состоянии и после вывода на орбиту автоматически с помощью ребер из сетки формируется поверхность параболического отражателя, характеристики которого удовлетворяют заданным требованиям на частоте до 8,2 ГГц. Облучатели антенны создают в раскрытие параболического отражателя сложное распределение поля, в результате чего в шести частотных диапазонах (от 0,136 до 8,15 ГГц) формируются ДН различной формы. По сложности и универсальности эта облучающая система превосходит большинство наземных антенн. Спутник ATS-6 использовался для экспериментов по непосредственному ТВ-вещанию со спутника на домашние телевизоры. На рис. 219 и рис. 220 показаны еще два проекта спутников гигантских размеров для решения ряда технологических задач.

Уже из рассмотрения этих нескольких спутников видно, что в их конструкциях весьма заметное место занимают антенны, причем сами антенны становятся все более сложными, что особенно четко прослеживается на примере таких спутников как спутник типа Intelsat, оснащенных многолучевыми зеркальными антеннами.

Пропускная способность спутников связи в последние годы стала ограничиваться выделенной шириной полосы частот. Один из методов преодоления этого ограничения заключается в повторном использовании полосы частот путем пространственного разнесения лучей бортовых антенн и/или при помощи ортогональной поляризации.

Для работы системы повторного использования частот необходимо, прежде всего, разработать конструкцию многолучевой антенны. Каж-

дый луч должен иметь низкий уровень боковых лепестков в направлении других пространственно разнесенных лучей; в каждом луче необходимо обеспечить развязку сигналов с ортогональной поляризацией, чтобы избежать перекрытия. В большинстве случаев для максимизации коэффициента усиления бортовой антенны форма луча должна согласовываться с формой зоны обслуживания. Чтобы обеспечить достаточную развязку в случаях, когда необходимо близко разместить несколько независимых лучей (на расстоянии меньше удвоенной ширины луча, считая от центральной от луча), следует увеличить крутизну ската ДН на краю луча. Достаточно низкий уровень первого бокового лепестка (порядка 35 дБ) может быть получен в антенне в виде вырезки из параболоида вращения. Такой тип антенн применялся и применяется в таких спутниках связи, как ANIK, Intelsat, COMSTAR и многих других. Так, в антенной системе спутника Intelsat IV-A (рис. 217) антенна представляет собой вырезку из параболоида со смещенным фокусом с облучающей многоэлементной решеткой. Рефлекторы имеют почти квадратную форму, размеры по бокам 1,35 и 0,89 м соответственно для передающей и приемной антенны. Вопросы поляризационной развязки двух антенн на спутнике COMSTAR (рис. 218) решаются с помощью



Рис. 217

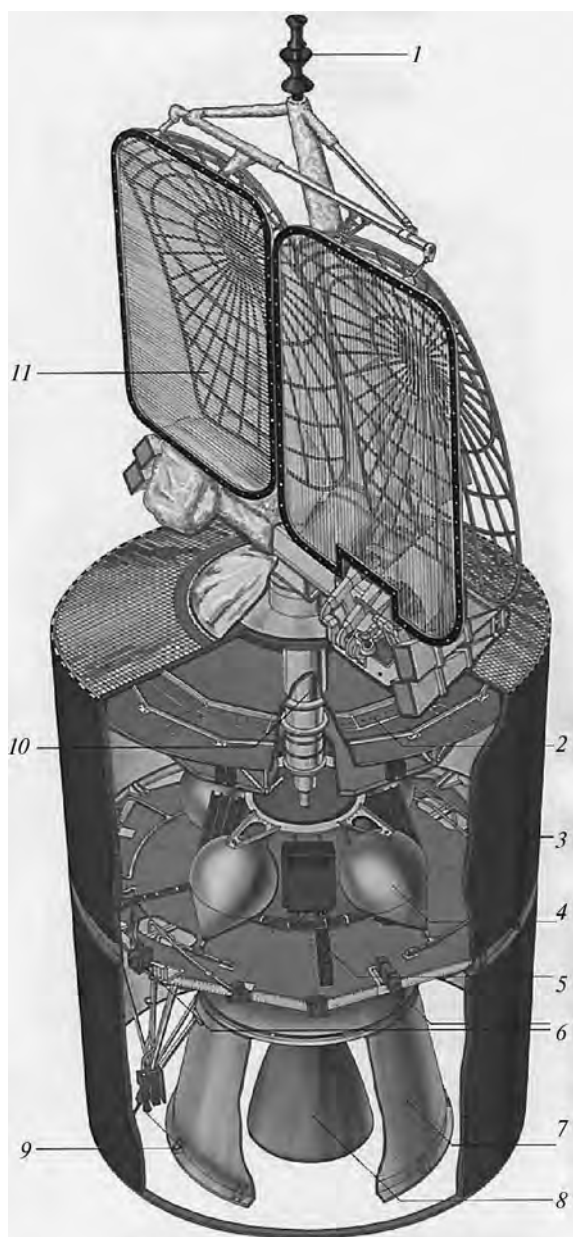


Рис. 218

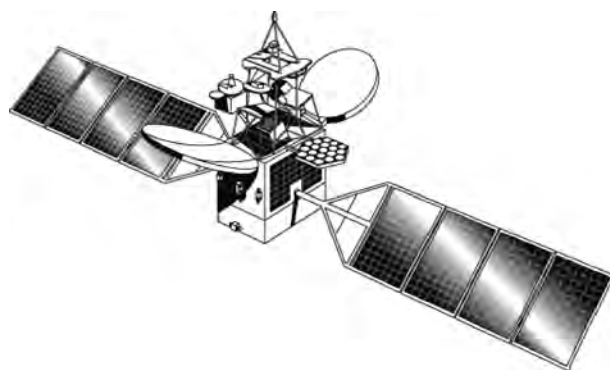


Рис. 219

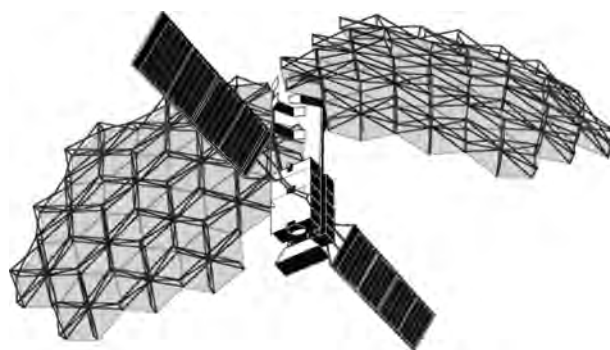


Рис. 220



Рис. 221

пространственных плоских решеток из однолинейных проводов.

Показательна конструкция зеркальных антенных комплексов спутника ATS-VI (рис. 219) и поражающий воображение комплекс антенн спутника ATS-VIII (рис. 220).

Советские спутники связи "Молния 1", "Молния 2", "Ямал" и "Горизонт" с их зеркальными антеннами показаны на рис. 221, 222, 223, 224 соответственно.

Спускаемые аппараты "Марс" и "Венера" тоже с зеркальными антеннами видны на рис. 225 и рис. 226. ИСЗ "Радуга" (рис. 227) обеспечивает круглосуточную связь со всеми населенными пунктами, находящимися на территории СССР. На рис. 228 показан спутник "Экспресс". Потребителями спутниковой связи, естественно, явля-

ются различные армейские службы всех уровней. На рис. 228, а представлена станция армейской спутниковой связи с зеркальной антенной на базе самоходной установки.

Спутниковая связь настолько бурно развивается, что даже перечислить невозможно все спутники, не то что показать их изображения. Но уже рассмотренные спутники позволяют выявить характерные тенденции в конструкциях их антенн — большинство из них относятся к классу зеркальных антенн. Особенно интересно отметить эту тенденцию в так называемых прикладных технологических спутниках АТС, в которых были заложены элементы будущих конструкций, так ATS-VI был предназначен для непосредственного TV-вещания. Он был оснащен антенной диаметром 9,1 м.



Рис. 222



Рис. 225

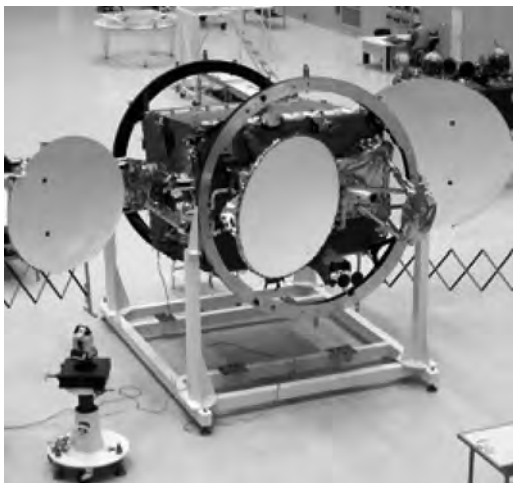


Рис. 223



Рис. 226



Рис. 224

Был разработан принцип многократной передачи сигналов с временным разделением — TDMA. В обычном построении системы информация, например от четырех станций, передается только в заранее выбранные интервалы времени. Каждая станция передает информационный импульс, а спутник транслирует его поочередно с другими импульсами. В варианте адресного построения системы с "переключением на спутнике" отдельные станции передают радиоимпульсы на спутник, причем каждый импульс содер-



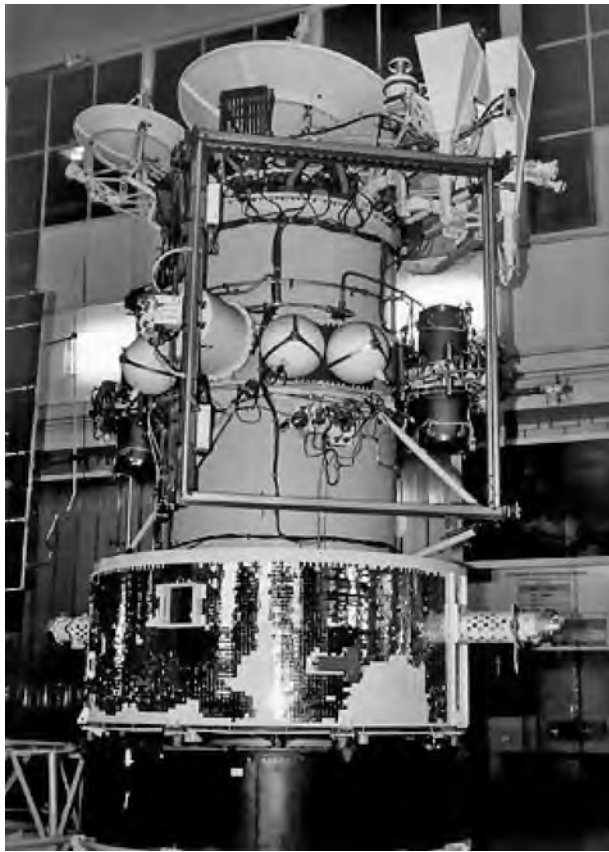


Рис. 227

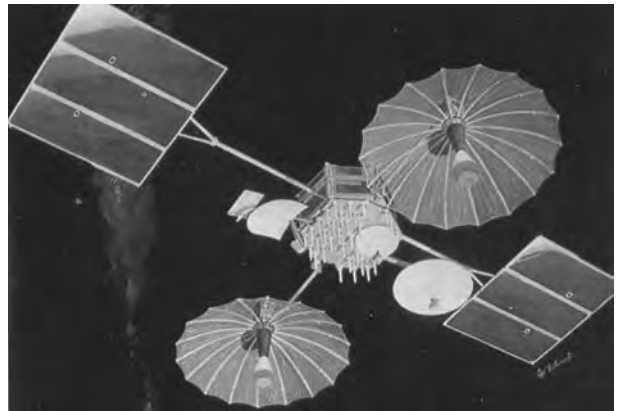


Рис. 229

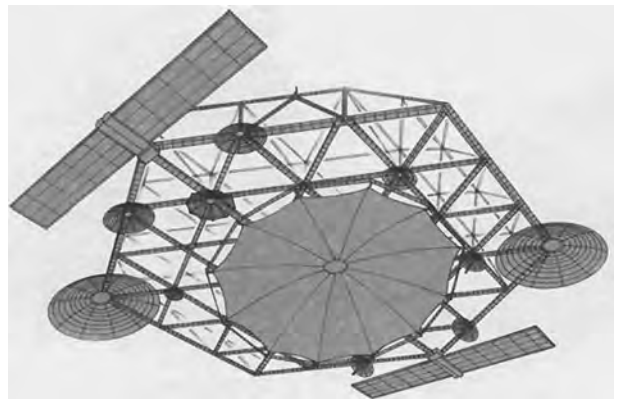


Рис. 230

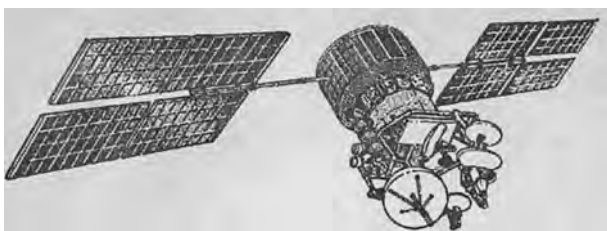


Рис. 228



Рис. 228, а

жит адрес другой станции. Спутник действует как коммутатор-переключатель. В предельном случае сам радиолуч осуществляет переключение, при этом антенна постоянно перенацеливается с одной станции на другую для передачи информации. Одним из элементов такой системы предполагалось применять спутник "ТДРС" (рис. 229). В пределе геостационарная платформа (рис. 230) связи в будущем сможет заменить большое число обычных специализированных спутников одной многоцелевой системой.

Итак, мы проследили в основном использование зеркальных антенн в космических проектах самого разного назначения — гражданского и военного. Как показывает опыт ведения современных боевых действий, в основе которых лежит принцип бесконтактной войны, главная роль в подавлении противника принадлежит бесконечно разнообразным спутниковым системам, которые в свою очередь ничто без самых совершенных антенн, в большинстве своем относящихся к различным модификациям зеркальных антенн, возможности которых в настоящее время еще далеко, далеко не исчерпаны! Это мы постараемся показать в следующих разделах.

# ТЕОРИЯ АБЕРРАЦИЙ И СКАНИРОВАНИЕ

---

В основе теории зеркальных сканирующих антенн лежит теория aberrаций третьего порядка. Причем эта теория позволяет правильно оценить как ожидаемые свойства данной сканирующей антенны, так и выбрать необходимый вариант антенны.

Данный материал базируется на известных из оптики понятиях, принятых в теории aberrаций третьего порядка. Здесь дано представление об искажениях, которые могут возникнуть в зеркальных антеннах при сканировании, приведены методы их устранения.

В теории оптических приборов за сотни лет накоплен обширный материал по созданию различных широкоугольных систем (телескопы, фото- и кинообъективы и др.), который в известной степени может быть применен в теории сканирующих антенн. К сожалению, зеркальные антенны (одно- и двухзеркальные) обладают очень малым набором степеней свободы, в отличие от многолинзовых объективов, и поэтому в антенной технике могут быть реализованы лишь самые простые методы создания широкоугольных систем. Сюда относятся методы построения апланатических и изопланатических антенн. Вместе с тем в антенной технике требуется гораздо более строгое исправление aberrаций, поскольку в оптике необходимость такого исправления ограничивается разрешающей способностью фотоэмульсий и анатомией человеческого глаза. Несколько облегчает задачу построения сканирующих антенн тот факт, что профили зеркал могут иметь с достаточной степенью точности любую форму, необходимую для исправления aberrаций, тогда как в оптике чаще всего используются лишь сферические и близкие к ним поверхности.

Следует отметить, что углы сканирования в антеннах значительно превосходят оптические системы и коррекция искажений в сканирующих антеннах требует разработки специальных методов, которые будут изложены ниже.

## ПОНЯТИЕ ОБ АБЕРРАЦИЯХ

---

Отклонение диаграммы направленности при выносе облучателя из фокуса в процессе сканирования во всех антеннах, кроме сферических, приводит к искажению диаграммы направлен-

ности: происходит расширение и изменение формы главного лепестка, увеличение боковых лепестков.

Искажения диаграммы направленности, так же как и искажения фазового распределения, называются, по аналогии с оптикой, aberrациями. В теории антенн наибольшее значение имеют следующие aberrации: сферическая aberrация, кома и астигматизм.

Сферическая aberrация адекватна квадратичному фазовому распределению в раскрыве и проявляется в симметричном расширении диаграммы направленности, увеличении боковых лепестков и "заплывании" нулей в диаграмме направленности.

Кома адекватна кубическому фазовому распределению и проявляется в несимметричном искажении диаграммы направленности.

Астигматизм возникает в трехмерных системах (например, осесимметричных) при смещении облучателя из фокуса. Он состоит в том, что точка оптимальной фокусировки в меридиональной плоскости не совпадает с точкой оптимальной фокусировки в сагиттальной плоскости. Под точкой оптимальной фокусировки в данной плоскости подразумевается точка расположения облучателя, соответствующая минимальной ширине диаграммы направленности в данной плоскости при данном угле отклонения диаграммы направленности.

Обычно фокусировка только по одной плоскости смысла не имеет, так как при расположении облучателя в точке, оптимальной лишь для одной плоскости, коэффициент направленного действия (КНД) не достигает наибольшего значения для данного угла сканирования, поскольку в другой плоскости диаграмма чрезмерно расширяется. Максимум КНД имеет место при расположении облучателя в некоторой средней точке, которая уже не является оптимальной ни для одной плоскости по отдельности. Астигматизм, таким образом, приводит к расширению диаграммы направленности.

Как правило, сканирование сопровождается появлением группы aberrаций. Так, в параболических антеннах имеют место все три типа aberrаций; в апланатических антеннах при сравнительно небольших углах сканирования проявляются сферическая aberrация и астигматизм. Только в сферических антеннах имеет место лишь сферическая aberrация.

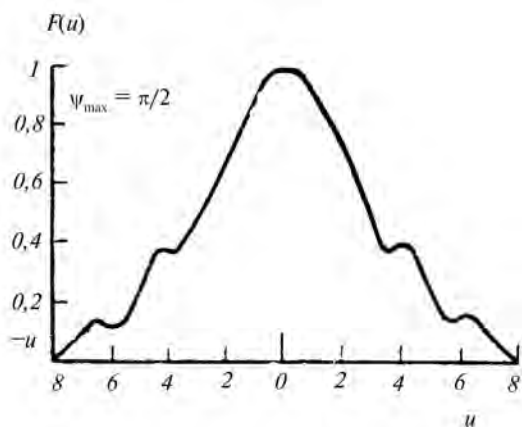


Рис. 231

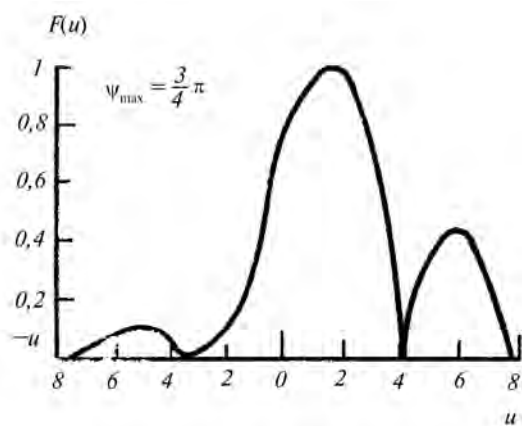


Рис. 232

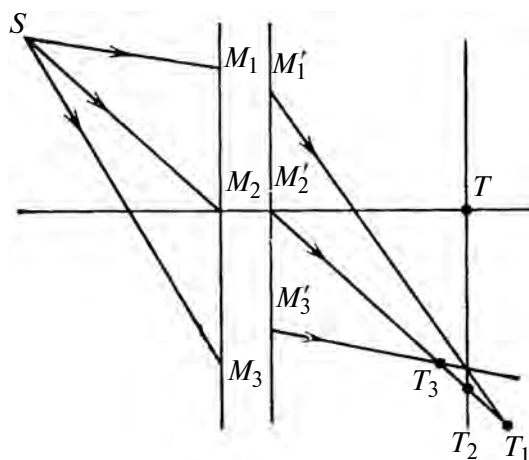


Рис. 233

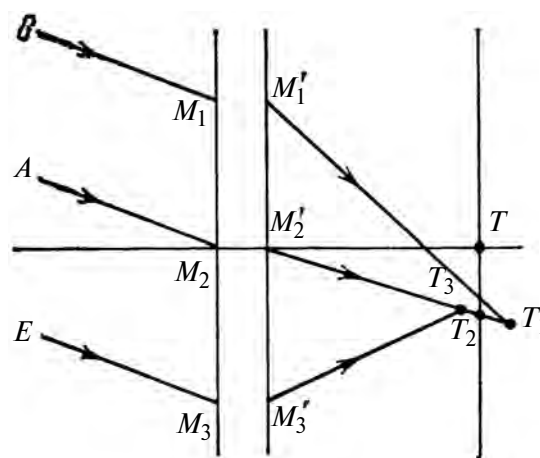


Рис. 234

На рис. 231 показаны диаграммы направленности при наличии только сферической aberrации, а на рис. 232 — только комы. На этих рисунках по вертикали отложено нормированное значение поля  $F(u)$ , а по горизонтали — обобщенная координата  $u = \frac{\beta a}{2} \sin \theta$ , где  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$  ( $\lambda$  — длина волны,  $\theta$  — угол, характеризующий распределение поля в пространстве,  $a$  — диаметр раскрыва);  $\psi_{\max}$  — максимальная величина фазовых искажений на краю раскрыва.

Диаграмма направленности при наличии астигматизма в сагиттальной плоскости характеризуется сферической aberrацией, а в меридиональной — сферической aberrацией и комой в параболических антеннах или только сферической aberrацией в апланатических антеннах.

В некоторых случаях можно оценивать характер имеющихся aberrаций по расположению лучей в области фокуса. В оптике (рис. 233) при конечном расстоянии изображаемой точки  $S$  от оси некоторой оптической системы лучи в фокальной плоскости  $TT_2$  в общем случае не собираются в одну точку. То же самое имеет место

и в телескопических системах (рис. 234). При такой структуре лучей обычно всегда можно выделить точку  $T_2$ , в которой сходятся лучи, проходящую через систему вблизи ее оси; эта область называется параксиальной, а точка, в которой они собираются, — параксиальным фокусом.

На рис. 235 и 236 показан осевой луч, параксиальный фокус  $K$  и две группы лучей, которые отражаются от антенны выше и ниже оси. Структура пучка лучей на рис. 235 соответствует случаю, когда в антенне имеет место в основном сферическая aberrация, так как лучи верхней и нижней групп пересекают осевой луч в районе параксиального фокуса и имеет место лишь расфокусировка лучей относительно него без существенного нарушения осевой симметрии пучка лучей вблизи фокуса.

На рис. 236 показана другая характерная структура лучей вблизи фокуса: области пересечения верхней и нижней групп лучей с осевым лучом располагаются по разные стороны от параксиального фокуса, и осевая симметрия пучка существенно нарушена. Этот случай соответствует наличию комы.

## УСЛОВИЕ СИНУСОВ

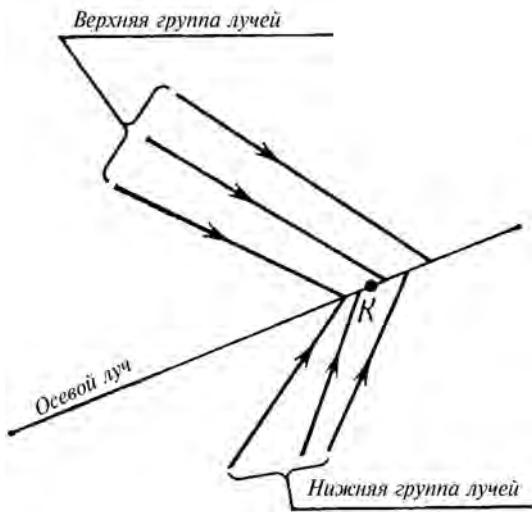


Рис. 235

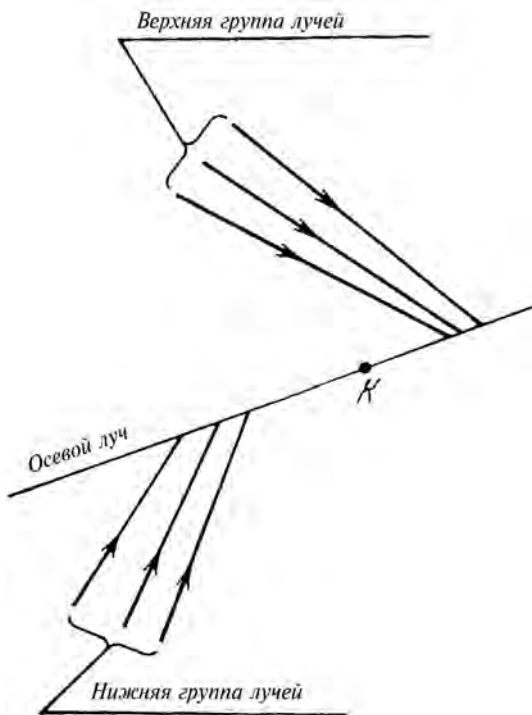


Рис. 236

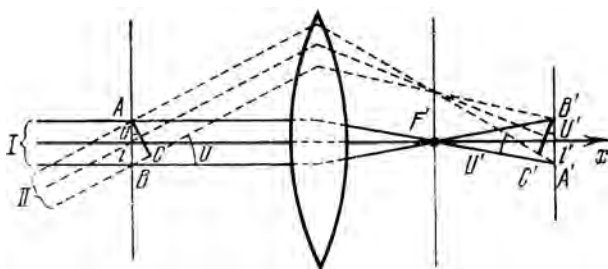


Рис. 237

В теории сканирующих антенн могут найти применение некоторые методы расчета широкоугольных оптических систем простейшего типа — апланатов, а также, в некоторых случаях, и анастигматов, поскольку реализация более сложных систем требует применения большого числа отражающих или преломляющих поверхностей.

Борн и Вольф в книге "Основы оптики" утверждают, что условие синусов было получено Клаузиусом в 1864 году, а Гельмгольцем в 1874 году. "Однако важность этого условия была замечена лишь после того, как его вторично сформулировал Аббе" (цитата).

Рассмотрим один из методов вывода условия синусов. Пусть представлена некоторая оптическая система, на которую падают два пучка лучей (*I* и *II*) под углом *U* к оси системы (рис. 237). Оптический путь вдоль лучей *II* от линии *AB* до линии *A'B'* отличается от оптического пути вдоль лучей *I* до тех же линий на величину  $BC - C'A' = 2l \sin U - 2l' n' \sin U'$ . Здесь  $2l = AB$ ,  $2l' = A'B'$ , *n* — коэффициент преломления в пространстве предмета, *n'* — в пространстве изображения.

Чтобы в пучке *II* точки *A* и *B* находились в одинаковой фазе, необходимо, чтобы выполнялось равенство  $BC - C'A' = 0$ , т. е.

$$n \sin U = n' \sin U',$$

или

$$\frac{n \sin U}{n' \sin U'} = \frac{l'}{l} = V. \quad (6)$$

Здесь *V* — константа, называемая линейным увеличением.

В этом случае точки, лежащие вблизи оси, изображаются широкими пучками резко.

Если  $n = n'$ , то

$$\frac{\sin U}{\sin U'} = \frac{l'}{l}. \quad (7)$$

**Две точки *S* и *S'*, для которых устранена сферическая aberrация и соблюдено условие синусов, называются апланатическими.**

Если одна из сопряженных плоскостей (объекта или изображения) находится на бесконечности, то уравнение (6) теряет смысл и поэтому должно быть преобразовано. Преобразование можно выполнить следующим способом. Пусть на рис. 238 представлена некоторая оптическая система, которая дает **точное** изображение точки *S* в виде точки *S'*. Рассмотрим изображение точки *P*, находящейся на расстоянии *l* от точки *S*. Найдем условие **резкого** изображения этой точки. Проведем через первый фокус системы плоскость *FQ*, перпендикулярную оси *SS'*. Выразим линейное

увеличение системы через расстояние первой сопряженной точки  $S$  до первого фокуса  $F$  (из прямоугольных треугольников  $SPF$  и  $FRH$ ):

$$V = l'/l = f/x.$$

Если система находится в воздухе, то  $f = f'$  и  $V = f'/x$ . Из треугольника  $SQF$  находим  $\sin U = h/\sqrt{h^2 + x^2}$ . Подставим в уравнение (6) вместо  $V$  и  $\sin U$  только что найденные значения; тогда после некоторых преобразований находим

$$\frac{h}{\sin U'} = \frac{f'\sqrt{h^2 + x^2}}{h} = f' \sqrt{1 + \frac{h^2}{x^2}}.$$

Если теперь удалить точку  $S$  в бесконечность, то при  $x = -\infty$  это уравнение примет вид

$$h/\sin U' = f'. \quad (8)$$

Так как луч  $SQ$  пойдет параллельно оси системы, то отрезок  $h$  имеет смысл высоты точки преломления (отражения) луча. Ход этих лучей в этом случае показан на рис. 239. В дальнейшем этот отрезок мы будем обозначать буквой  $y$ .

При произвольном расположении в пространстве пучка расходящихся и параллельных лучей (рис. 240) условие синусов можно записать в виде

$$\sin \varphi = y/f + P. \quad (9)$$

Последнее соотношение и представляет собой условие синусов Аббе в более общем виде. Здесь постоянная  $P$  определяет расположение луча в раскрыве, соответствующего тому лучу источника, для которого угол  $\varphi = 0$  (рис. 240); если  $P = 0$ , то это значит, что луч  $\varphi = 0$  и соответствующий ему луч в раскрыве идут по одному направлению. Это имеет место в осесимметричных антеннах.

Постоянная  $f$  в общем случае определяет размеры раскрыва антенны, а в осесимметричных антеннах является фокусным расстоянием. В этом случае условие синусов имеет вполне определенную геометрическую интерпретацию: отношение  $\sin \varphi/y = 1/f = \text{const}$  справедливо, очевидно, только для одной кривой — окружности. Эта окружность представляет собой геометрическое место точек пересечения лучей источника и соответствующих им лучей в раскрыве антенны (рис. 241). Радиус этой окружности  $f$  и называется фокусным расстоянием антенны, удовлетворяющей условию синусов, т. е. апланатической антенны.

Если провести аналогию с параболической антенной, то соответствующая кривая имеет вид параболы (эквивалентная парабола), а радиус-вектор ее поверхности можно рассматривать как фокусное расстояние отдельных участков параболической антенны.

В некоторых случаях представляет интерес учет еще одного аспекта условия синусов, а имен-

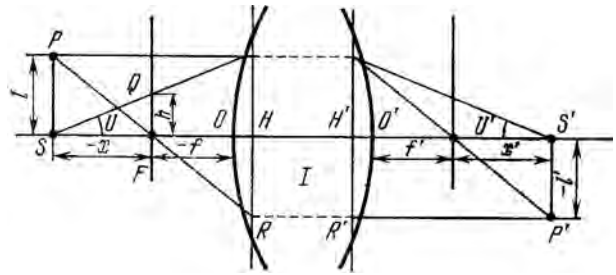


Рис. 238

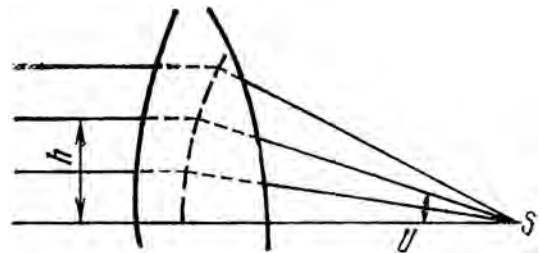


Рис. 239

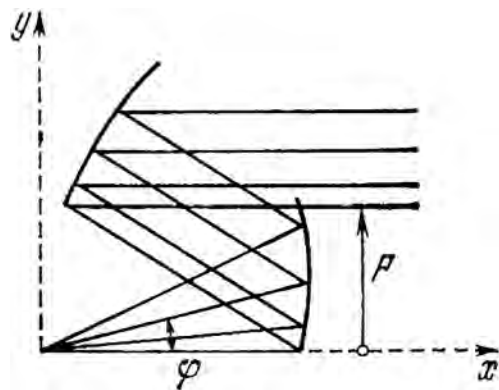


Рис. 240

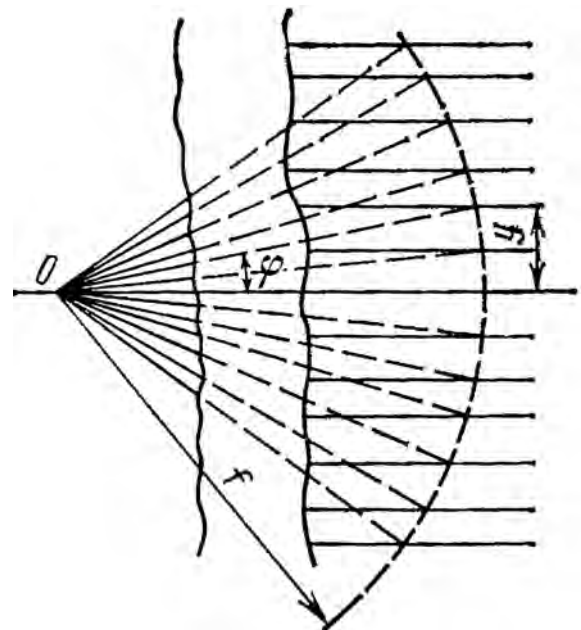


Рис. 241

но, особенностей амплитудного распределения в раскрыве апланатических антенн.

Из уравнения баланса энергий

$$P(\theta)\sin\theta d\theta = P(y)dy \quad (10)$$

следует, что распределение мощности в раскрыве имеет вид

$$P(y) = \frac{P(\theta)\sin\theta}{ydy/d\theta}.$$

Здесь  $P(\theta)$  — диаграмма направленности облучателя по мощности,  $P(y)$  — распределение мощности в раскрыве антенны,  $\theta$  — угол, характеризующий направление лучей облучателя, эквивалентный углу  $\varphi$  на рис. 240;  $y$  — ордината соответствующих лучей в раскрыве антенны. Подставляя вместо  $y$  его значение из (9) при  $P = 0$  и дифференцируя, получим для распределения мощности в раскрыве апланатической антенны следующее выражение (нормированное):

$$P(y) = \frac{P(\theta)}{\cos\theta}. \quad (11)$$

Простейший анализ этого выражения показывает, что в апланатических антеннах имеет место увеличение апертурного коэффициента использования поверхности раскрыва антенны (КИП), например, по сравнению с параболическими антеннами, у которых распределение мощности в раскрыве имеет вид

$$P(y) = 0,5P(\theta)(1 + \cos\theta).$$

Из выражения (11) видно, что если диаграмма направленности источника может быть аппроксимирована функцией  $\cos\theta$ , апертурный КИП равен единице, т. е. имеет место равномерное распределение поля в раскрыве апланатической антенны.

Рассмотрим более детально процесс отклонения волнового фронта в апланатической антенне при выносе источника из фокуса. Вся антенну, весь ее раскрыв можно представить как сумму элементарных антенн, находящихся на разном расстоянии от оси. Каждая такая антенна имеет свое элементарное главное зеркало в точке  $A_1$  (или  $A_2, \dots$ ) и элементарное вспомогательное зеркало в точке  $B_1$  (или  $B_2, \dots$ ) и все эти элементарные антенны характеризуются одинаковыми фокусными расстояниями (рис. 242)  $OC_1$  (или  $OC_2$ ).

Поскольку все элементарные антенны имеют общий фокус, то при сканировании отклонение элементарных волновых фронтов в каждой антенне зависит только от величины фокусного расстояния, а при равенстве этих фокусных расстояний все элементарные фронты отклоняются на одинаковый угол и общий волновой фронт не будет искажаться.

Легко показать, что в параболической антенне (двух- и однозеркальной) аналогичные элемен-

тарные антенны имеют разное фокусное расстояние, равное радиусу-вектору эквивалентной параболы в соответствующих точках. Поэтому эквивалентные волновые фронты отклоняются на разные углы при сканировании, а суммарный волновой фронт будет искажен.

Приведенный вывод условия синусов является типичным и повторяется бездумно во множестве публикаций. Так, в книге "Основы оптики" Борна и Вольфа речь идет о **резком** изображении точки, не лежащей на оси, в книге Михельсона "Оптические телескопы" говорится, что "условие, при котором оптическая система строит **идеальное** изображение весьма малого, но конечного участка объекта, перпендикулярного оптической оси и близкого к ней, носит название условия синусов Аббе" (цитата).

Таким образом, если подходить непредвзято, условие синусов задумано как условие безаберрационного изображения внеосевых точек изображаемого предмета. В переходе к антенной терминологии это означает условие неискаженного сканирования в некотором угловом секторе, т. е. создание антенны по крайней мере бифокальной или точнее полифокальной.

Следует особенно подчеркнуть, что при выводе условия синусов вообще речь не идет ни о каких аберрациях: говорится только о резком, идеальном изображении внеосевых точек! И поэтому говорить, что условие синусов есть условие отсутствия конкретной аберрации комы это значит подменять действительное на желательное!

Далее, при выводе условия синусов присутствует определенная доля наивности. Действительно, как видно из рис. 237, рассматривается только одно сечение — меридиональное, а говорится о резком, идеальном и т. п. изображении внеосевых точек, как будто речь идет только о двумерных системах и сагиттального сечения не существует вовсе! Отсюда возникают проблемы с астигматизмом в реальных трехмерных апланатах — телескопах и антеннах. Эту проблему мы еще рассмотрим в разделах "Апланаты по Аббе" и "Апланаты по Максудову".

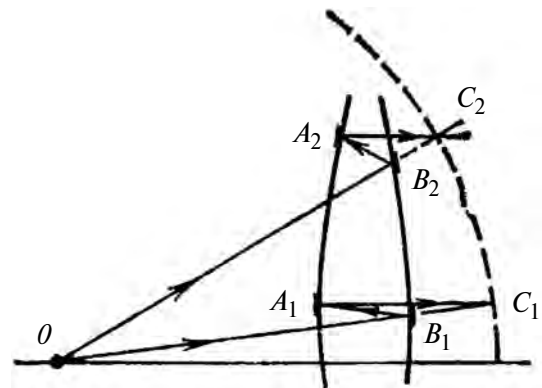


Рис. 242

## УСЛОВИЕ ИЗОАПЛАНАТИЗМА

Условие изопланатизма, или условие Штебле—Лигоцкого, в отличие от условия синусов, относится к системам, имеющим неточечный источник, или, что то же самое, к системам с остаточной сферической абберацией, которая имеет место и при расположении источника в фокусе на оси.

Системы, удовлетворяющие условию Штебле—Лигоцкого, не имеют комы, как и апланатические антенны. В геометрической оптике устройство является изопланатическим, если для него выполняется следующее условие:

$$\frac{n}{n'} \frac{\sin U}{\beta \sin U'} - 1 = \frac{\delta S'}{S' - x'}, \quad (12)$$

где  $\delta S'$  — сферическая абберация,  $\beta$  — увеличение системы,  $S'$  — расстояние от системы до изображения,  $x'$  — параметр,  $U$  — угол, определяющий луч в пространстве предметов,  $U'$  — угол в пространстве изображения.

В приложении к антенной технике условие Штебле—Лигоцкого может найти применение в следующих случаях:

1. Зеркало специальной формы облучается некоторым распределенным источником (система рупоров или линейный источник).

2. Зеркало специальной формы облучается комбинацией точечного источника и некоторого отражателя.

Например, на рис. 243 показана антенна, содержащая главное зеркало 1, вспомогательное зеркало 2 и облучатель 3. В процессе сканирования главное зеркало поворачивается на некоторый угол (на рисунке новое положение зеркала показано штриховой линией, а его ось штрихпунктиром). Облучатель 3 и вспомогательное зеркало 2 остаются неподвижными.

В каждом случае сканирование производится путем поворота главного зеркала при неподвижной облучающей системе или путем смещения облучающей системы относительно оси антенны.

Расчет зеркала и облучающей системы ведется, исходя из необходимости получения плоского волнового фронта и выполнения условия Штебле—Лигоцкого при осевом направлении диаграммы направленности.

Очевидно, что приведенное условие изопланатизма не может быть использовано в таком виде для расчета антенн, поскольку они должны быть сфокусированы на бесконечность, т. е. должны создать параллельный пучок лучей.

Для расчета антенн условие изопланатизма (рис. 244) может быть преобразовано к следующему виду:

$$f \sin \theta = \alpha y. \quad (13)$$

Здесь  $f$  — расстояние от центра поворота  $O$  управляющего зеркала до точки пересечения отраженного луча с осью антенны,  $\theta$  — угол отраженного луча с осью,  $y$  — ордината луча в раскрыве,  $\alpha$  — константа. Начало координат помещено в центре поворота  $O$ .

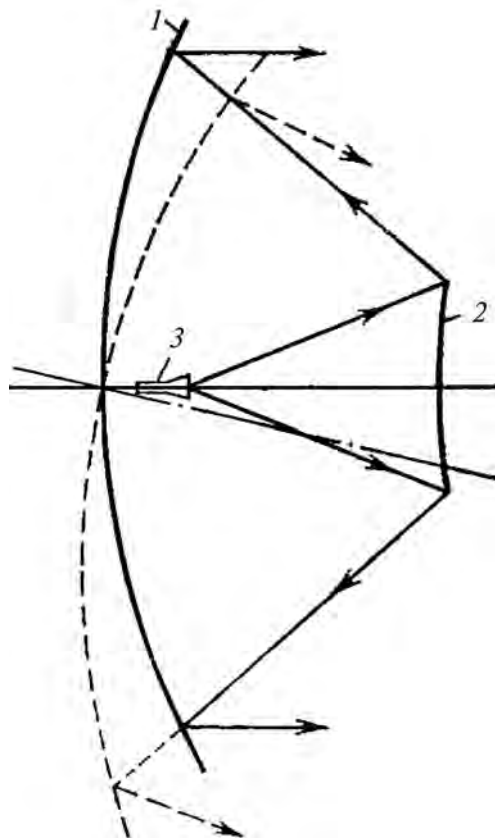


Рис. 243

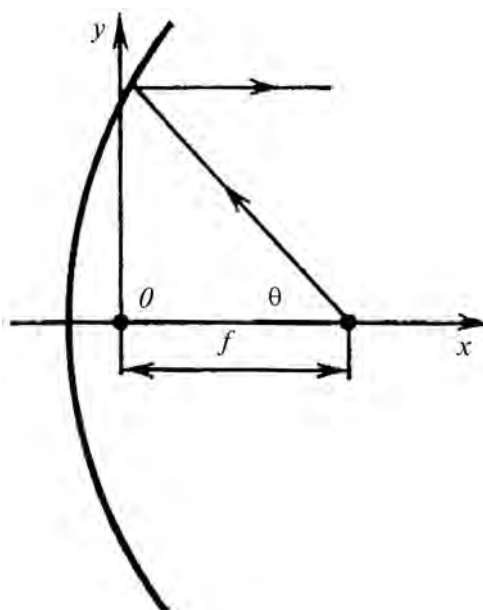


Рис. 244

## УСЛОВИЕ КОСИНУСОВ

Обращаясь к выводу закона косинусов, представим себе, что в пространстве предметов в среде с показателем преломления  $n$  как угодно расположен элемент линии  $dl = AA_1$ , а в пространстве изображений в среде с показателем  $n'$  находится элемент линии  $dl' = A'A'_1$ , сопряженный с элементом  $dl$  (рис. 245). Необходимо уточнить, что здесь речь идет о сопряжении в смысле оптики Гаусса. При этом точечного изображения каждой точки элемента  $dl$  в соответствующей точке элемента  $dl'$  может не быть. Только для сопряженных точек  $A$  и  $A'$  мы предположим условие точечного изображения выполненным, вследствие чего должно быть справедливо условие

$$AA' = \text{const}_1.$$

Мы предполагаем, следовательно, что оптическая длина пути постоянна вдоль всех лучей, соединяющих точки  $A$  и  $A'$ . Наша задача заключается в том, чтобы точечное изображение распространилось на все точки элемента  $dl$ , а следовательно и на точку  $A_1$ .

Представим себе, далее, один из лучей, связывающих по условию  $AA' = \text{const}_1$  точки  $A$  и  $A'$ , например, луч  $ABCA'$ , проходящий на своем пути через оптическую систему (не показанную на чертеже) и образующий с элементом  $dl$  угол  $\alpha$ , а с элементом  $dl'$  — угол  $\alpha'$ . Проведем через точку  $A_1$  луч  $A_1B_1C_1A'_1$ , параллельный лучу  $AB$  в пространстве предметов. В пространстве изображения лучи  $CA'$  и  $C_1A'_1$  не параллельны друг другу, а скрещиваются, не пересекаясь.

В пространстве предметов опустим из точки  $A_1$  перпендикуляр  $A_1B$  на луч  $AB$ . Оба луча  $AB$  и  $A_1B_1$  нормальны к отрезку  $A_1B$ . Поэтому последний можно рассматривать как элементарный отрезок, лежащий на некоторой фиксированной волновой поверхности. Пусть далее в пространстве изображений отрезок  $CC_1$  представляет кратчайшее расстояние между скрещивающимися лучами  $CA'$  и  $C_1A'_1$ . По известной теореме стереометрии можно утверждать, что оба луча  $CA'$  и  $C_1A'_1$  нормальны к кратчайшему расстоянию  $CC_1$  между ними. Поэтому и элементарный отрезок  $CC_1$  можно считать лежащим на фиксированной волновой поверхности, нормальными к которой служат лучи  $CA'$  и  $C_1A'_1$ . По закону

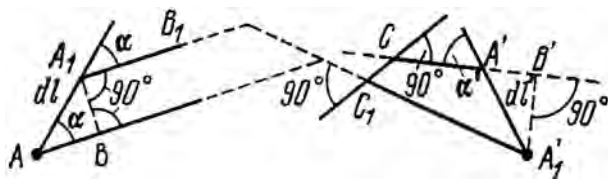


Рис. 245

тавтохронизма оптическая длина хода лучей между волновыми поверхностями  $A_1B$  и  $CC_1$  постоянна. Поэтому  $BC = A_1C_1$ .

Мы хотим, чтобы изображение точки  $A_1$  было точечным. В таком случае по условию образования точечного изображения должно выполняться следующее выражение:

$$A_1A'_1 = \text{const}_2.$$

Пользуясь чертежом, можно написать:

$$A_1C_1 + n'C_1A'_1 = \text{const}_2.$$

Формулу  $AA' = \text{const}_1$  также можно представить в виде выражения

$$nAB + BC + n'CA' = \text{const}_1. \quad (14)$$

Из точки  $A'_1$  опустим перпендикуляр  $A'_1B'$  на луч  $CA'$ . Отрезок  $CA'$  можно представить как разность отрезков  $CB'$  и  $A'B'$ . Поэтому получим

$$nAB + BC + n'CB' - n'A'B' = \text{const}_1.$$

Отрезок  $CB'$  есть расстояние между концами перпендикуляров, опущенных из концов отрезка  $C_1A'_1$  на луч  $CB'$ . Поэтому отрезок  $CB'$  есть ортогональная проекция отрезка  $C_1A'_1$  на луч  $CB'$  и выражается формулой

$$CB' = C_1A'_1 \cos d\gamma = C_1A'_1.$$

Здесь  $d\gamma$  — бесконечно малый угол между лучами  $CA'$  и  $C_1A'_1$ , косинус которого отличается от единицы на пренебрежимо величину высшего порядка. Вследствие того, что  $BC = A_1C_1$  и  $CB' = C_1A'_1 \cos d\gamma = C_1A'_1$ , выражение (14) запишется так:

$$nAB + A_1C_1 + n'C_1A'_1 - n'A'B' = \text{const}_1.$$

Вычитая из него выражение  $A_1C_1 + n'C_1A'_1 = \text{const}_1$ , находим  $nAB - n'A'B' = dC$ , где  $dC$  — константа, отличная от предыдущих.

Из треугольников  $ABA_1$  и  $A'B'A'_1$  следует

$$AB = dl \cos \alpha, \quad A'B' = dl' \cos \alpha'.$$

Вследствие этого из предыдущей формулы получаем

$$ndl \cos \alpha - n'dl' \cos \alpha' = dC.$$

Это и есть закон косинусов, впервые полученный А. Конради. Однако в такой форме эта закономерность мало пригодна для практического применения. Во-первых, потому, что в ней присутствуют бесконечно малые отрезки  $dl$  и  $dl'$ , и, во-вторых, потому что в ней имеется неопределенная постоянная  $dC$ .

Устранить из этого выражения бесконечно малые величины можно почленным делением его на  $dl$ . При этом следует учесть, что  $dl'/dl$  есть линейное увеличение  $V$  оптической системы,



а  $dC/dl$  — некоторая неопределенная, но конечная константа  $C$ . Таким образом, получим

$$n \cos \alpha - V n' \cos \alpha' = C.$$

Поскольку константа  $C$  есть величина универсальная для всех лучей, то можно взять еще один, вспомогательный луч, характеризуемый углами  $\alpha_0$  и  $\alpha'_0$ . Тогда

$$n \cos \alpha_0 - n' V \cos \alpha'_0 = C.$$

Для исключения константы  $C$  вычтем почленно одно выражение косинусов из другого:

$$n(\cos \alpha - \cos \alpha_0) + n' V(-\cos \alpha'_0 + \cos \alpha'_0) = 0.$$

Для придания закону косинусов более симметричной формы решим это уравнение относительно  $V$ :

$$V = \frac{n(\cos \alpha - \cos \alpha_0)}{n'(\cos \alpha' - \cos \alpha'_0)}. \quad (15)$$

Выражение закона косинусов (15) является наиболее удобным для практического применения.

Закон косинусов легко преобразуется в закон синусов, если точки  $A$  и  $A'$  отрезков  $dl$  и  $dl'$  лежат на оптической оси системы, а сами отрезки  $dl$  и  $dl'$  перпендикулярны к оптической оси (рис. 246). В более общем случае можно полагать, что луч, на котором лежат эти точки, не претерпевает излома внутри системы и является в частном случае осью симметрии рассматриваемого сечения. Чтобы достичь точечного изображения также и для внеосевых концов  $A_1$  и  $A'_1$  этих отрезков, необходимо выполнение закона косинусов. Так

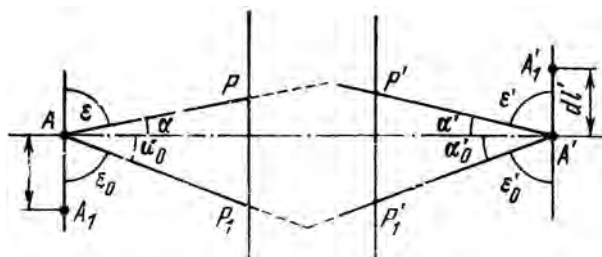


Рис. 246

как на чертеже углы, образованные лучами с отрезками  $dl$  и  $dl'$ , обозначены как  $\epsilon$  и  $\epsilon'$ , и учитывая, что отношение  $dl'/dl$  есть линейное увеличение оптической системы, получим

$$V = \frac{n(\cos \epsilon - \cos \epsilon_0)}{n'(\cos \epsilon' - \cos \epsilon'_0)}.$$

Из рисунка видно, что углы  $\epsilon$  и  $\epsilon'$  дополняют до  $90^\circ$  углы  $\alpha$  и  $\alpha'$ , а углы  $\epsilon_0$  и  $\epsilon'_0$  — соответственно углы  $\alpha_0$  и  $\alpha'_0$ , поэтому

$$V = \frac{n(\sin \alpha - \sin \alpha_0)}{n'(\sin \alpha' - \sin \alpha'_0)}.$$

Для определения углов  $\alpha_0$  и  $\alpha'_0$  выберем начальный луч так, чтобы он совпадал с оптической осью. Тогда оба угла  $\alpha_0$  и  $\alpha'_0$  становятся равными нулю, и выражение упрощается:

$$V = \frac{n \sin \alpha}{n' \sin \alpha'}.$$

Это есть известная формулировка закона синусов.

## РАСЧЕТ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В РЕЖИМЕ ПРИЕМА И ПЕРЕДАЧИ

При исследовании и проектировании зеркальных сканирующих антенн важно знать пространственный фронт волны в антенне, как в режиме приема, так и в режиме передачи, поскольку наличие астигматизма в зеркальных сканирующих антеннах требует учета фазовых искажений и оптимизации параметров не только в меридиональной, но и в сагиттальной плоскости, а также и в других сечениях антенны. Так, например, знание пространственного фазового распределения в режиме приема необходимо для определения оптимального положения облучателя при сканировании, а в режиме передачи — для определения направления максимального излучения, изменения формы диаграммы направленности при сканировании, величины КНД и др.

Эта задача может быть в некоторых случаях решена в аналитической форме с помощью метода волновых фронтов.

Сформулируем сначала закон отражения в векторной форме. Пусть на рис. 247  $AD$  — плоская отражающая поверхность, единичная нормаль к которой  $\eta$ , а единичный вектор, направленный вдоль падающего луча,  $\mathbf{r}$ . Тогда единичный вектор, направленный по отраженному лучу  $\xi$ , может быть найден из соотношения  $\xi = \mathbf{r} - 2\mathbf{a}$ , следующего из рис. 247. Подставляя в него  $\mathbf{a} = \eta(\mathbf{r}\eta)$ , получаем

$$\xi = \mathbf{r} - 2\eta(\mathbf{r}\eta).$$

Это соотношение и есть закон отражения векторной форме.

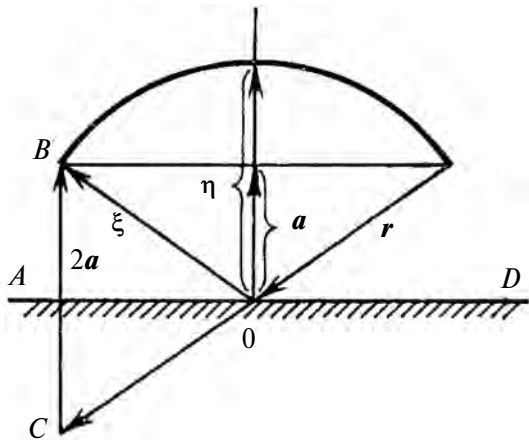


Рис. 247

Пусть теперь на рис. 248  $\mathbf{X}(u, v)$  — радиус-вектор поверхности фронта падающей волны,  $\mathbf{R}(s, t)$  — радиус-вектор поверхности отражателя,  $\mathbf{Y}(p, q)$  — радиус-вектор поверхности отраженной волны. Легко видеть, что вектор  $\mathbf{Y}$  равен

$$\mathbf{Y} = (C - |\mathbf{R} - \mathbf{X}|)\xi + \mathbf{R}.$$

Здесь  $C$  — длина оптического пути от падающего фронта до отраженного, а первое слагаемое есть по существу вектор, направленный от точки падения фронта на отражатель до отраженного фронта.

Если фронт  $\mathbf{X}$  представляет собой поверхность сферы, то его удобно задавать в виде вектора, определяющего точку расположения облучателя, полагая, что фронт стянут в эту точку.

Для того чтобы выразить отраженный фронт в координатной форме, можно воспользоваться условием ортогональности лучей и поверхностей волновых фронтов

$$(\mathbf{R} - \mathbf{X}) \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial u} = 0,$$

$$(\mathbf{R} - \mathbf{X}) \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial v} = 0.$$

Эти уравнения позволяют выразить переменные  $s, t$  через  $u, v$  и вектор  $\mathbf{Y}$  будет функцией только двух переменных.

Связь между координатами  $u, v$  и  $p, q$  можно установить, решая следующие уравнения, опре-

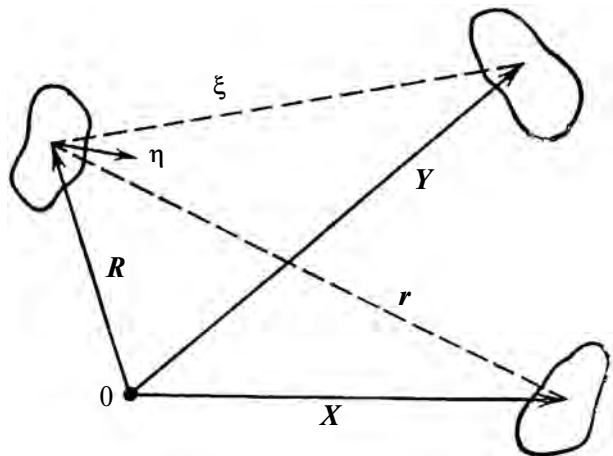


Рис. 248

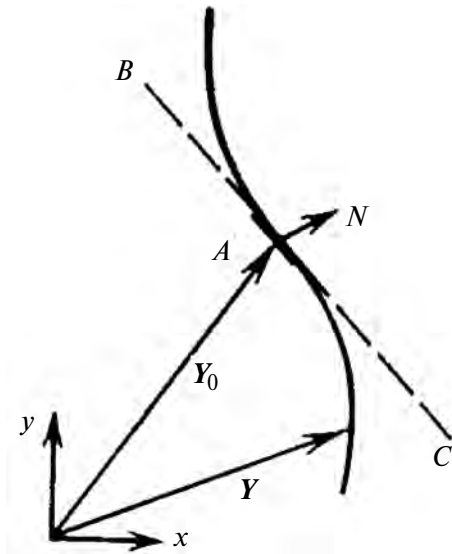


Рис. 249

деляющие ортогональность лучей к поверхностям фронтов:

$$(\mathbf{Y} - \mathbf{X} + G\xi_y) \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial u} = 0, \quad (\mathbf{Y} - \mathbf{X} + G\xi_y) \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial v} = 0,$$

где

$$G = \frac{C^2 - (\mathbf{Y} - \mathbf{X})^2}{2[C + (\mathbf{Y} - \mathbf{X})\xi_y]},$$

$\xi_y$  — единичный вектор, равный  $\xi_y = \xi_x - 2\eta(\eta\xi_x)$ .

Эти соотношения представляют собой систему из двух скалярных уравнений, решая которую, получим зависимость  $p(u, v)$ ,  $q(u, v)$  либо  $u(p, q)$ ,  $v(p, q)$ .

И, наконец, анализ сканирующих антенн обычно включает в себя сравнение реального волнового фронта с эталонным плоским.

Пусть на рис. 249  $\mathbf{Y}$  — радиус-вектор поверхности некоторого фронта волны,  $\mathbf{Y}_0$  — радиус-вектор одной из точек фронта отраженной волны, а  $N$  — единичная нормаль в этой точке фронта. Плоскость, перпендикулярная этому вектору, и является эталонной.

Отклонение  $\Delta$  поверхности фронта  $\mathbf{Y}$  от плоскости, определяемой вектором  $N$ , равно

$$\Delta(u, v) = [\mathbf{Y}(u, v) - \mathbf{Y}_0]N.$$

Очевидно, анализ фронта волны можно производить как в режиме приема, так и в режиме передачи. На рис. 250 показан фронт волны в раскрыве антенны, т. е. в режиме передачи, а на рис. 251 фронт показан в фокальной области, т. е. в режиме приема.

Ниже приводятся формулы для расчета пространственного фронта волны и хода лучей в двухзеркальной антенне в режиме приема при произвольном направлении прихода плоской волны, а также в режиме передачи при произвольном расположении точечного облучателя. Формулы получены на основе законов геометрической оптики и метода преобразования волновых фронтов.

Пусть на систему зеркал (рис. 252) падает плоская волна под углом  $\alpha$  к оси антенны. Направляющие косинусы единичной нормали  $\vec{p}_r$  к фронту FWR падающей волны:

$$p_{rx} = -\cos\alpha_r, \quad p_{ry} = -\sin\alpha_r \cos\gamma, \quad p_{rz} = -\sin\alpha_r \sin\gamma,$$

где  $\gamma$  — угол между осью  $y$  и плоскостью, проходящей через ось  $x$  и нормаль к падающему фронту волны.

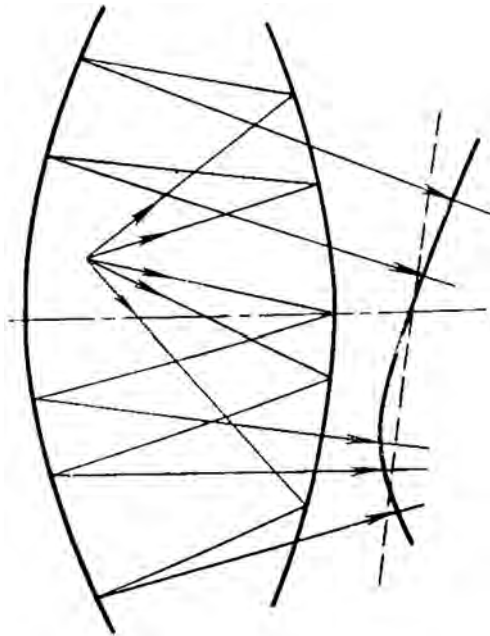


Рис. 250

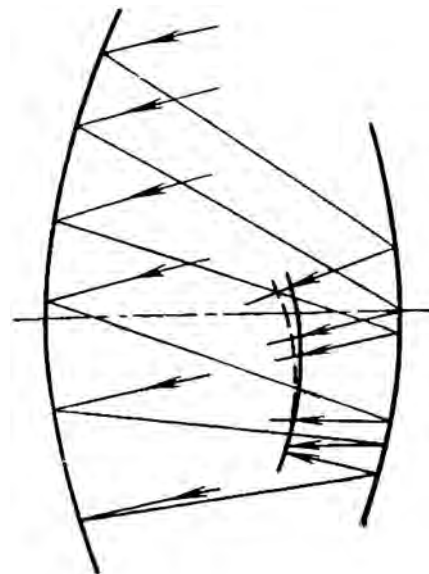


Рис. 251

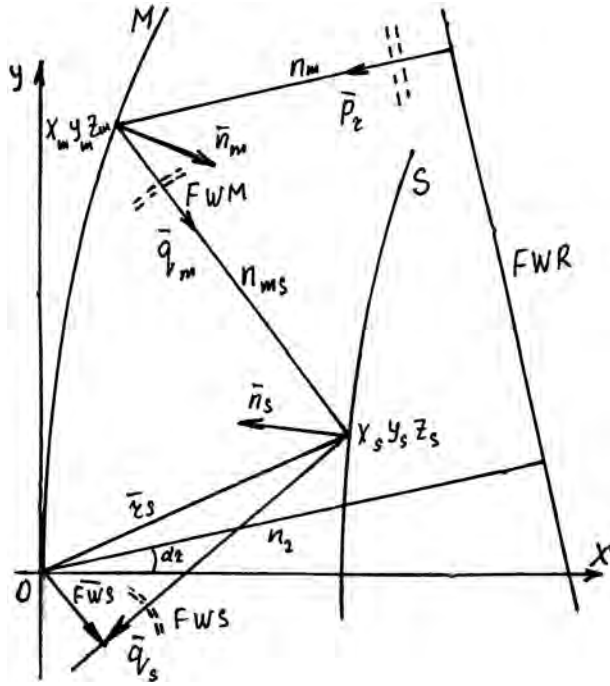


Рис. 252

Зададим координаты точки на поверхности главного зеркала  $x_m; y_m; z_m$ , в которую падает произвольный луч плоского фронта волны. Согласно законам геометрической оптики нормаль к зеркалу, падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости.

Направляющие косинусы единичной нормали  $\bar{n}_m$  к поверхности главного зеркала в точке  $x_m; y_m; z_m; n_{mx}; n_{my}; n_{mz}$ :

Для осесимметричной антенны:  $n_{mx} = \cos \psi_m$ ,

$$n_{my} = \sin \psi_m \cos \alpha_m, \quad n_{mz} = \sin \psi_m \sin \alpha_m,$$

где  $\psi_m$  — угол между нормалью к поверхности главного зеркала в точке  $x_m; y_m; z_m$  и осью  $x$ ;  $\alpha_m$  — угол между осью  $y$  и плоскостью сечения поверхности главного зеркала, проходящей через точку  $x_m; y_m; z_m$  и ось  $x$ .

Единичная нормаль  $\bar{q}_m$  к фронту волны  $FWM$ , отраженной от поверхности главного зеркала, связана с  $\bar{p}_r$  и  $\bar{n}_m$  соотношением  $\bar{q}_m = \bar{p}_r - 2(\bar{n}_m \bar{p}_r) \bar{n}_m$  или для соответствующих направляющих косинусов:

$$q_{mx} = p_{rx} - 2(n_{mx} p_{rx} + n_{my} p_{ry} + n_{mz} p_{rz}) n_{mx},$$

$$q_{my} = p_{ry} - 2(n_{mx} p_{rx} + n_{my} p_{ry} + n_{mz} p_{rz}) n_{my},$$

$$q_{mz} = p_{rz} - 2(n_{mx} p_{rx} + n_{my} p_{ry} + n_{mz} p_{rz}) n_{mz}.$$

Уравнение прямой, вдоль которой распространяется луч, отраженный от поверхности главного зеркала в точке  $x_m; y_m; z_m$ ,

$$(x - x_m)/q_{mx} = (y - y_m)/q_{my} = (z - z_m)/q_{mz}. \quad (16)$$

Для определения координат точки пересечения этой прямой с поверхностью вспомогательного зеркала первоначально зададим некоторую вспомогательную плоскость, перпендикулярную оси  $x$ , и найдем координаты точки пересечения прямой (16) и этой плоскости, а затем проверим, принадлежит ли эта точка поверхности вспомогательного зеркала.

Координаты точки пересечения прямой (16) с плоскостью  $x = U_s$ :

$$x_s = x_m - q_{mx} t_s,$$

$$y_s = y_m - q_{my} t_s,$$

$$z_s = z_m - q_{mz} t_s,$$

где  $t_s = (x_m - U_s)/q_{mx}$ .

Направляющие косинусы единичной нормали  $\bar{n}_s$  к поверхности вспомогательного зеркала в точке  $x_s; y_s; z_s; n_{sx}; n_{sy}; n_{sz}$ :

Для осесимметричной антенны:

$$n_{sx} = \cos \psi_s,$$

$$n_{sy} = \sin \psi_s \cos \alpha_s,$$

$$n_{sz} = \sin \psi_s \sin \alpha_s,$$

где  $\psi_s$  — угол между нормалью к поверхности вспомогательного зеркала в точке  $x_s; y_s; z_s$  и осью  $x$ ;  $\alpha_s$  — угол между осью  $y$  и плоскостью сечения поверхности вспомогательного зеркала, проходящей через точку  $x_s; y_s; z_s$  и ось  $x$ .

Единичная нормаль  $\bar{q}_s$  к фронту  $FWS$  волны, отраженной от поверхности вспомогательного зеркала, связана с  $\bar{q}_m$  и  $\bar{n}_s$  соотношением  $\bar{q}_s = \bar{q}_m - 2(\bar{n}_s \bar{q}_m) \bar{n}_s$  или для соответствующих направляющих косинусов

$$q_{sx} = q_{mx} - 2(n_{sx} q_{mx} + n_{sy} q_{my} + n_{sz} q_{mz}) n_{sx},$$

$$q_{sy} = q_{my} - 2(n_{sx} q_{mx} + n_{sy} q_{my} + n_{sz} q_{mz}) n_{sy},$$

$$q_{sz} = q_{mz} - 2(n_{sx} q_{mx} + n_{sy} q_{my} + n_{sz} q_{mz}) n_{sz}.$$

Фронт  $FWS$  волны, отраженной от поверхности вспомогательного зеркала, в режиме приема определяется выражением  $\bar{FWS} = (C - H_m - H_{ms}) \bar{q}_s + \bar{r}_s$  или

$$FWS_x = (C - H_m - H_{ms}) q_{sx} + x_s,$$

$$FWS_y = (C - H_m - H_{ms}) q_{sy} + y_s,$$

$$FWS_z = (C - H_m - H_{ms}) q_{sz} + z_s,$$

где  $H_m = |x_m p_{rx} + y_m p_{ry} + z_m p_{rz} - H_r|$  — расстояние от фронта падающей волны до точки  $x_m; y_m; z_m$  поверхности главного зеркала;  $H_r$  — расстояние от начала координат до фронта падающей волны;  $H_{ms} = [(x_m - x_s)^2 + (y_m - y_s)^2 + (z_m - z_s)^2]^{1/2}$ ;  $C$  — константа, определяющая положение отраженного фронта волны по отношению к падающему.

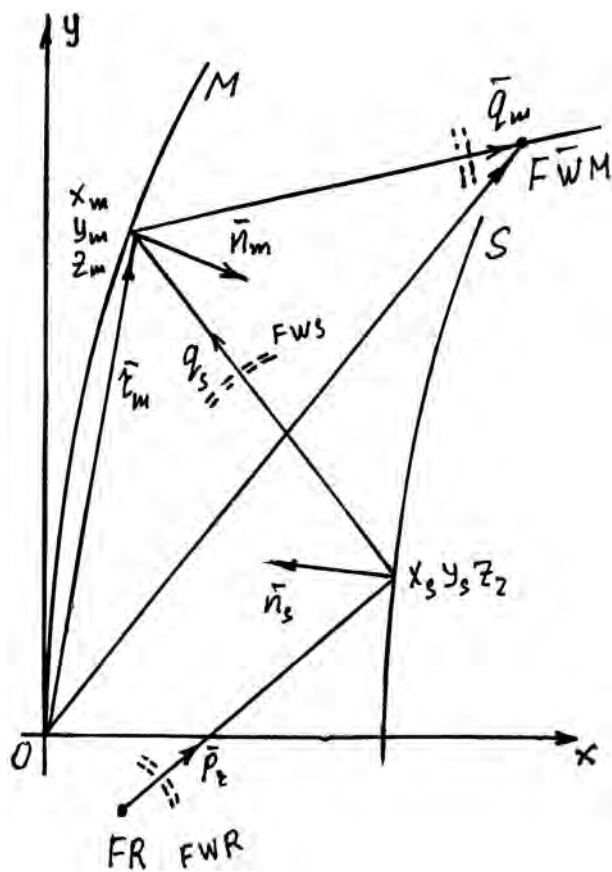


Рис. 253

Для расчета фазового распределения в режиме передачи предположим, что точечный источник находится в некоторой произвольной точке  $FR$  (рис. 253), определяемой координатами  $x_r; y_r; z_r$ .

Зададим координаты  $x_s; y_s; z_s$  точки на поверхности вспомогательного зеркала, в которую падает луч из источника.

Направляющие косинусы единичной нормали  $\bar{p}_r$  к фронту волны, падающей из источника в точку  $x_s; y_s; z_s$ :

$$p_{rx} = (x_s - x_r)/H_{rs},$$

$$p_{ry} = (y_s - y_r)/H_{rs},$$

$$p_{rz} = (z_s - z_r)/H_{rs},$$

где  $H_{rs} = [(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2 + (z_s - z_r)^2]^{1/2}$  — расстояние от источника до точки  $x_s; y_s; z_s$ .

Единичная нормаль  $\bar{q}_s$  к фронту FWS волны, отраженной от поверхности вспомогательного зеркала, связана с  $\bar{p}_r$  и  $\bar{n}_s$  соотношением  $\bar{q}_s = \bar{p}_r - 2(\bar{n}_s \bar{p}_r) \bar{n}_s$ .

Уравнение прямой, вдоль которой распространяется луч, отраженный от вспомогательного зеркала в точке  $x_s; y_s; z_s$ :

$$(x - x_s)/q_{sx} = (y - y_s)/q_{sy} = (z - z_s)/q_{sz}.$$

Точка пересечения этой прямой с поверхностью главного зеркала находится аналогично такой же точке в режиме приема. Ее координаты:

$$x_m = x_s - q_{sx} t_m, y_m = y_s - q_{sy} t_m, z_m = z_s - q_{sz} t_m,$$

где  $t_m = (x_s - U_m)/q_{sx} t_m$ ,  $U_m$  — координата, определяющая положение вспомогательной плоскости.

Единичная нормаль  $\bar{q}_m$  к фронту FWM волны, отраженной от поверхности главного зеркала, связана с  $\bar{q}_s$  и  $\bar{n}_m$  соотношением  $\bar{q}_m = \bar{q}_s - 2(\bar{n}_m \bar{q}_s) \bar{n}_m$ .

Фронт FWM волны, отраженной от поверхности главного зеркала, в режиме передачи определяется выражением  $F\bar{W}M = (C - H_{rs} - H_{ms}) \bar{q}_m + \bar{r}_m$  или  $FWM_x = (C - H_{rs} - H_{ms}) q_{mx} + x_m$ ,  $FWM_y = (C - H_{rs} - H_{ms}) q_{my} + y_m$ ,  $FWM_z = (C - H_{rs} - H_{ms}) q_{mz} + z_m$ .

## ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПРИ СКАНИРОВАНИИ

Рассмотрим методику графического исследования искажений в двухзеркальных сканирующих антеннах в геометрооптическом приближении. Как известно, в зеркальных антеннах данному углу отклонения диаграммы направленности соответствует целый ряд положений облучателя. Однако всегда необходимо выбирать оптимальное положение, так как ему соответствует наибольшее значение коэффициента направленного действия.

В процессе предварительного исследования иногда можно обойтись без строгого расчета возникающих искажений формы волнового фронта, поскольку такой расчет требует привлечения ЭВМ.

Определение оптимальных координат облучателя сводится к перебору различных положений облучателя и оценке возникающих искажений волнового фронта. Процесс может быть несколько ускорен, если первоначально рассматривать режим приема с целью ориентировочного определения оптимальных координат, а затем в режиме передачи уточнить это расположение по форме волнового фронта и диаграммы направленности при вариации координат фазового центра облучателя в ограниченных пределах.

Рассмотрим ход лучей в двухзеркальной антенне в приемном режиме. На рис. 254 показана некоторая двухзеркальная антенна, на главное зеркало которой падает пучок параллельных лучей, образующих угол  $\alpha$  с осью антенны. Луч  $AB$  принадлежит этому пучку. Для построения луча  $BC$ , отраженного от главного зеркала, через точку

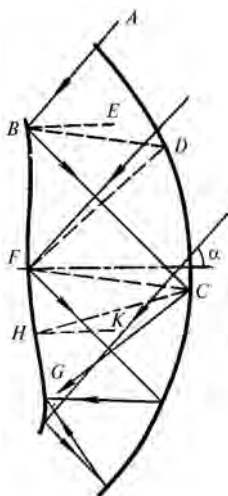


Рис. 254

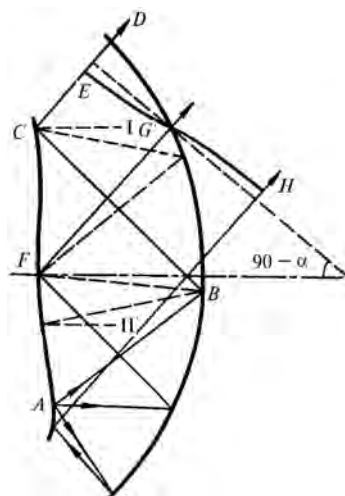


Рис. 255

ку  $B$  необходимо провести луч  $FDBF$ , идущий в точку  $B$  из фокуса антенны  $F$ . Тогда, используя равенство углов  $ABE$  и  $DBC$ , можно достаточно точно провести луч  $BC$ , отразившийся от главного зеркала.

Для построения луча  $CG$ , отражающегося от вспомогательного зеркала, поступаем аналогично: через точку  $C$  проводим луч, идущий из фокуса антенны (луч  $FCHK$ ). Используя равенство углов  $BCF$  и  $HCG$ , проведем луч  $CG$ .

Аналогичная процедура может быть проделана для построения целого ряда лучей, число и расположение которых определяется, исходя из необходимой точности анализа. После того как будут построены все лучи, в фокальной плоскости образуется семейство пересекающихся линий; в том месте, где пересекается наибольшее число линий (это место определяется визуально), выбирается ряд точек, в которые можно поместить источники для уточнения координат оптимальной фокальной точки при работе на передачу.

Рассмотрим ход лучей в двухзеркальной антенне в режиме передачи. На рис. 255 показан ход луча  $ABCD$  и ряда других лучей, исходящих из точки  $A$ , расположение которой выбрано указанным выше образом. Для того чтобы обеспечить наибольшую точность при графическом построении хода лучей, в каждой точке отражения от главного и вспомогательного зеркала проводим лучи, идущие из фокуса  $F$ . На рис. 255 показаны такие вспомогательные лучи  $I$  и  $II$ , с помощью которых построены лучи  $BC$  и  $CD$ , отраженные от вспомогательного и главного зеркал. Здесь использовано известное из оптики правило: угол между двумя лучами, падающими в некоторую точку на отражающей поверхности, равен углу между ними и после их отражения от этой поверхности.

После того как построен необходимый ряд лучей, вдоль них откладываем одинаковые оптические пути от точки  $A$ . Точки на лучах, соответствующие одинаковым оптическим путям, соединяем плавной кривой и получаем сечение волнового фронта плоскостью сканирования (линия  $EGH$ ). Затем проводим эталонную прямую под углом  $90^\circ - \alpha$  к оси антенны через полученный фронт и вычисляем среднеквадратическое отклонение фронта от эталонной прямой. Эталонная прямая обычно проводится через точку, лежащую на том луче, который отражается от вершины главного зеркала (на рис. 255 это точка  $G$ ).

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРА ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕННЫ ПРИ СКАНИРОВАНИИ

Специфической особенностью разработки сканирующих зеркальных антенн является определение оптимальных координат расположения облучателя для данного угла отклонения диаграммы направленности.

На рис. 256 и 257 показан ход лучей в различных антеннах, когда на них падает наклонный пучок параллельных лучей: на рис. 256 — в параболической антенне, на рис. 257 — в антенне Кассегрена.

Из приведенных рисунков видно, что в фокальной области каждой антенны имеет место достаточно сложная структура лучей, и для наиболее эффективного перехвата этих лучей рупорным облучателем ограниченных размеров необходимо провести соответствующие исследования. Лучи в области фокуса образуют каустику — кривая Чирнхаузена (1701 год).

Для двумерной задачи каустика может быть определена различными способами: либо через параметры отраженного волнового фронта, либо через параметры падающего волнового фронта

и отражателя. В первом случае уравнение каустики имеет вид

$$\mathbf{F} = \mathbf{Y} + \xi \mathbf{R},$$

где  $\mathbf{Y}$  — отраженный волновой фронт,  $\xi$  — орт нормали к  $\mathbf{Y}$ , т. е. орт соответствующего луча,  $R$  — радиус кривизны волнового фронта  $\mathbf{Y}$ .

Уравнение каустики можно записать в координатной форме:

$$F_x = Y_x + \xi_x (Y_x^{12} + Y_y^{12})^{3/2} \frac{1}{\begin{vmatrix} Y_{xx}^{11} & Y_{xy}^{11} & Y_x^1 \\ Y_{yx}^{11} & Y_{yy}^{11} & Y_y^1 \\ Y_x^1 & Y_y^1 & 0 \end{vmatrix}},$$

где  $Y(y, z) = 0$  — уравнение волнового фронта.

Каустика может быть определена, если известна отражающая поверхность  $\mathbf{R}$  и направление

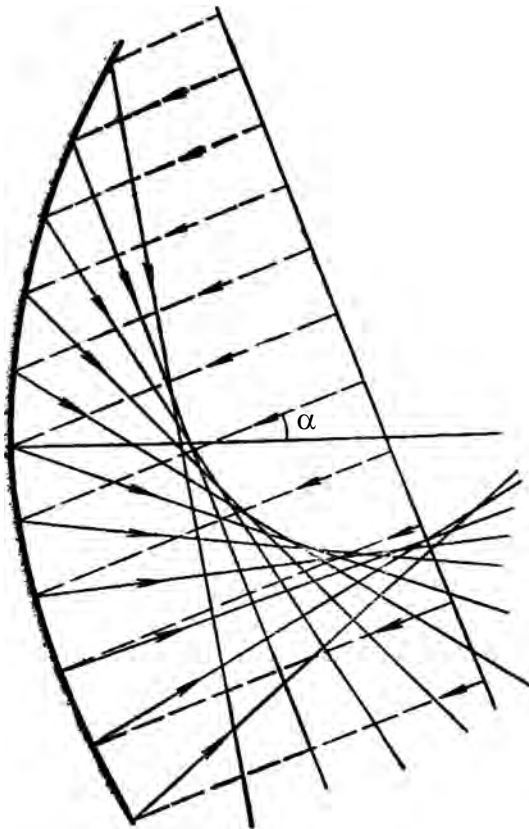


Рис. 256

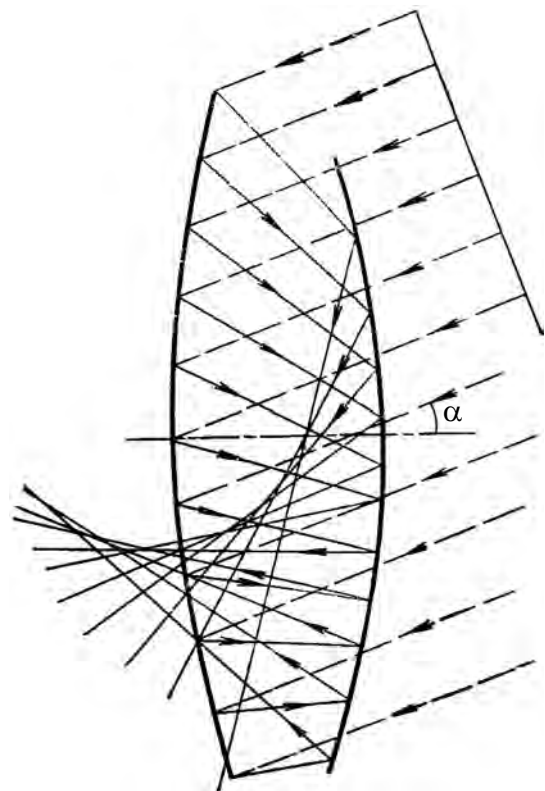


Рис. 257

отраженных от нее лучей, характеризуемых вектором  $\alpha_k$ . Уравнение каустики в этом случае есть

$$\mathbf{F} = \mathbf{R} + M\alpha_k,$$

где  $M = (2K_{\text{отр}} - K_{\text{пад}} \cos\gamma)^{-1} \cos\gamma$ , а  $K_{\text{отр}}$  и  $K_{\text{пад}}$  — соответственно кривизна отраженного и падающего волнового фронта,  $\gamma$  — угол падения.

Удобно определить кастику в параметрическом виде. В качестве параметра может быть выбран угол наклона падающих на поверхность лучей либо угол наклона отраженных лучей.

Точка каустики есть точка возврата первого рода. Иногда полезно связать кастику с фазовой характеристикой. Если использовать уравнение эйконала, радиус кривизны волновой поверхности  $R$  можно представить в виде

$$R = \frac{\cos^2(\arcsin\psi')}{\psi''},$$

где  $\psi$  — функция, определяющая распределение фазы поля вдоль раскрыва,  $\psi'$  и  $\psi''$  — производные фазовой функции по координате раскрыва.

Таким образом, для двумерной задачи кастика представляет собой эволюту, а соответствующая ей эвольвента — волновой фронт.

Для трехмерной (пространственной) задачи расчеты гораздо сложнее. Применяют теорию нормальных конгруэнций — двухпараметрической системы лучей, имеющей поверхность, ортогонально пересекающую эти лучи. Эти нормальные поверхности в свою очередь составляют однопараметрическое семейство — они представляют собой поверхности волнового фронта.

Очевидно, что при наличии каустики в фокальной области точечный облучатель может перехватить лишь очень ограниченную часть лучей и его нужно расположить в такой области каустики, где имеет место наибольшее сгущение лучей, т. е. облучатель должен располагаться в некотором эквивалентном центре каустики.

Рассмотрим постановку этой задачи в режиме передачи, считая, что эквивалентным центром каустики является центр некоторой окружности, которая наилучшим (например, в среднеквадратичном смысле) способом аппроксимирует волновой фронт, соответствующий данной каустике.

Рассмотрим в общем виде методику определения эквивалентного центра — приема, если волновой фронт в фокальной области антенны задан набором точек, как это обычно имеет место при расчете сложных двухзеркальных антенн с помощью ЭЦВМ.

Пусть имеется система точек  $x_n, y_n$ , соответствующих координатам фронта в фокальной области (рис. 258). Что представляет собой эквивалентный центр фронта? Понятие эквивалентного центра можно дать, исходя из принципа Гюйгенса: каждую точку волнового фронта можно рассматривать как новый источник излучения.

В этом случае поле в некоторой произвольной точке  $O$  образуется в результате интерференции полей от всех точек волнового фронта. Напряженность поля в точке  $O$  зависит от того, с какими фазами складываются поля, создаваемые элементами волнового фронта. Если фронт имеет форму сферы, а точка  $O$  совпадает с ее центром, то в этой точке поля складываются в фазе и имеет место наибольшая напряженность поля. Во всех остальных точках напряженность поля будет меньше, а точку, в которой она наибольшая, мы считаем средним фазовым центром соответствующего фронта волны. Если фронт не имеет форму сферы, то наибольшая напряженность поля будет в той точке, где разность фаз полей от элементов фронта будет наименьшей, точнее, где будет наименьшим квадратичное отклонение разности фаз от нуля.

Разность фаз в произвольной точке  $O$  можно выразить через расстояние от этой точки до отдельных точек волнового фронта. Пусть  $x_n, y_n$  — координаты точек фронта волны,  $x, y$  — неизвестные координаты среднего фазового центра волнового фронта,  $R_n$  — расстояние от точки  $O(x, y)$  до отдельных точек на волновом фронте:

$$R_n = \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2}.$$

В этом случае разность фаз

$$\Delta\psi = 2\pi/\lambda(R_n - R),$$

где  $R$  — некоторая постоянная, имеющая физический смысл радиуса окружности с центром в точке  $O(x, y)$ .

Квадратичное отклонение фронта от этой окружности имеет вид

$$F = \sqrt{\sum_{n=1}^N (R_n - R)^2}.$$

Координаты точки  $O(x, y)$  и радиус  $R$  можно найти из системы уравнений

$$F'_R = 0, F'_x = 0, F'_y = 0.$$

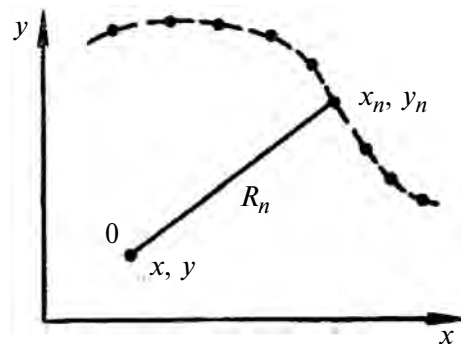


Рис. 258



Здесь

$$F'_R = \frac{\sum_{n=1}^N (R_n - R)}{F},$$

$$F'_x = \frac{\sum_{n=1}^N (R_n - R) \frac{\partial R_n}{\partial x}}{F},$$

$$F'_y = \frac{\sum_{n=1}^N (R_n - R) \frac{\partial R_n}{\partial y}}{F}.$$

Поскольку  $\frac{\partial R_n}{\partial x} = \frac{x - x_n}{R_n}$ ,  $\frac{\partial R_n}{\partial y} = \frac{y - y_n}{R_n}$ , то

$$R = \frac{\sum_{n=1}^N R_n}{N},$$

$$\sum_{n=1}^N (x - x_n) - R \frac{\partial}{\partial x} \sum_{n=1}^N R_n = 0,$$

$$\sum_{n=1}^N (y - y_n) - R \frac{\partial}{\partial y} \sum_{n=1}^N R_n = 0.$$

Введем следующие обозначения:

$$\sum_{n=1}^N x_n = X, \quad \sum_{n=1}^N y_n = Y, \quad \sum_{n=1}^N R_n = f(x, y).$$

Для определения координат  $x$ ,  $y$  центра окружности и ее радиуса  $R$  можно получить следующую систему уравнений:

$$R = \frac{f(x, y)}{N},$$

$$x = \frac{X}{N} + \frac{f(x, y)}{N^2} \frac{\partial f(x, y)}{\partial x},$$

$$y = \frac{Y}{N} + \frac{f(x, y)}{N^2} \frac{\partial f(x, y)}{\partial y},$$

которая может быть решена методом последовательных приближений.

Изложенная методика определения среднего фазового центра волнового фронта не учитывает амплитудного распределения вдоль этого фронта. Амплитудное распределение играет роль весовой функции, определяющей вклад отдельных частей фронта с учетом того, какое поле они создают.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СКАНИРОВАНИИ

Рассмотрим в общем виде методику определения искажений волнового фронта, если фронт волны в плоскости раскрыва антенны задан набором точек. Если фронт волны плоский, то максимальная напряженность электромагнитного поля будет в точке наблюдения, находящейся в направлении, перпендикулярном плоскому волновому фронту, так как в этом направлении разность фаз полей от элементов волнового фронта равна нулю.

Если волновой фронт отличается от плоского, то наибольшая напряженность поля будет в точке наблюдения, находящейся в том направлении, в котором разность фаз полей от элементов волнового фронта будет наименьшей. Реальный волновой фронт можно сравнить с плоским волновым фронтом, ориентированным по отношению к реальному фронту таким образом, что направление максимального излучения у обоих фронтов совпадает, а отклонение реального фронта от плоского будет наименьшим.

Таким образом, если реальный волновой фронт аппроксимировать плоским фронтом, отклонение которого от реального фронта будет наименьшим, то ориентация плоского фронта определит направление максимального излучения реального волнового фронта, а величина отклонения реального фронта от плоского определит искажение волнового фронта.

Аппроксимацию реального волнового фронта плоским будем проводить по методу наименьших квадратов. При этом искажение волнового фронта можно определить среднеквадратической величиной отклонения реального волнового фронта от плоского.

Пусть имеется система точек  $x_n, y_n, z_n$ , соответствующих реальному волновому фронту. Плоский волновой фронт запишем в виде уравнения плоскости в координатной форме в нормальном виде:

$$x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma - p = 0,$$

где  $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$  — направляющие косинусы нормали, проведенной из начала координат к плоскости,  $p$  — расстояние от начала координат до плоскости.

В этом уравнении независимыми параметрами являются  $p, \alpha$  и  $\beta$ , поскольку угол  $\gamma$  связан с углами  $\alpha$  и  $\beta$  следующим соотношением:

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1.$$

Отклонение произвольной точки реального волнового фронта от плоского определяется расстоянием  $d_n$  от произвольной точки  $x_n, y_n, z_n$  до плоскости

$$d_n = x_n \cos \alpha + y_n \cos \beta + z_n \cos \gamma - p.$$

Согласно методу наименьших квадратов из всевозможных плоскостей в качестве аппроксимирующей плоскости выберем такую, для которой наименьшее значение имеет величина

$$M = \sum_{n=1}^N d_n^2.$$

Поскольку плоскость вполне опре-

деляется параметрами  $p, \alpha$  и  $\beta$ , то наилучшие в указанном смысле значения этих параметров найдутся решением системы уравнений

$$\frac{\partial M}{\partial p} = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial M}{\partial \beta} = 0.$$

Запишем производные функции  $M$  по параметрам  $p, \alpha$  и  $\beta$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial p} &= 2 \sum_{n=1}^N d_n \frac{\partial d_n}{\partial p}, \\ \frac{\partial M}{\partial \alpha} &= 2 \sum_{n=1}^N d_n \frac{\partial d_n}{\partial \alpha}, \quad \frac{\partial M}{\partial \beta} = 2 \sum_{n=1}^N d_n \frac{\partial d_n}{\partial \beta}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \frac{\partial d_n}{\partial p} &= -1, \\ \frac{\partial d_n}{\partial \alpha} &= -x_n \sin \alpha + z_n \frac{\sin 2\alpha}{2(1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta)^{1/2}}, \\ \frac{\partial d_n}{\partial \beta} &= -y_n \sin \beta + z_n \frac{\sin 2\beta}{2(1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta)^{1/2}}. \end{aligned}$$

Таким образом, система уравнений для определения параметров  $p, \alpha$  и  $\beta$  аппроксимирующей плоскости имеет следующий вид:

$$\sum_{n=1}^N d_n \frac{\partial d_n}{\partial p} = 0, \tag{17}$$

$$\sum_{n=1}^N d_n \frac{\partial d_n}{\partial \alpha} = 0, \tag{18}$$

$$\sum_{n=1}^N d_n \frac{\partial d_n}{\partial \beta} = 0, \tag{19}$$

Из уравнения (17) получим

$$p = \frac{1}{N} \left[ \cos \alpha \sum_{n=1}^N x_n + \cos \beta \sum_{n=1}^N y_n + (1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta)^{1/2} \sum_{n=1}^N z_n \right].$$

Подставив значение  $p$  в уравнения (18) и (19) и обозначив

$$f_1(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^N d_n \frac{\partial d_n}{\partial \alpha}, f_2(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^N d_n \frac{\partial d_n}{\partial \beta},$$

получим систему двух уравнений с двумя неизвестными

$$f_1(\alpha, \beta) = 0, f_2(\alpha, \beta) = 0. \quad (20)$$

Функции  $f_1(\alpha, \beta)$  и  $f_2(\alpha, \beta)$  имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} f_1(\alpha, \beta) &= S_1 \sin 2\alpha - \sin \alpha [S_1 \cos \beta + \\ &+ S_3(1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta)^{1/2}] + \\ &+ \frac{\sin 2\alpha}{2(1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta)^{1/2}} (S_3 \cos \alpha + S_4 \cos \beta), \\ f_2(\alpha, \beta) &= S_5 \sin 2\beta - \sin \beta [S_2 \cos \alpha + \\ &+ S_4(1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta)^{1/2}] + \\ &+ \frac{\sin 2\beta}{2(1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta)^{1/2}} (S_3 \cos \alpha + S_4 \cos \beta), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{1}{2} \left[ \sum_{n=1}^N z_n^2 - \sum_{n=1}^N x_n^2 + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^N x_n \right)^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^N z_n \right)^2 \right], \\ S_2 &= \sum_{n=1}^N x_n y_n - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \sum_{n=1}^N y_n, \\ S_3 &= \sum_{n=1}^N x_n z_n - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \sum_{n=1}^N z_n, \\ S_4 &= \sum_{n=1}^N y_n z_n - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n \sum_{n=1}^N z_n. \end{aligned}$$

Поскольку выражения для  $f_1$  и  $f_2$  имеют сложный вид, то для решения системы уравнений (20) следует применять численные методы решения, например метод Ньютона.

Пусть  $\alpha = \alpha_0$  и  $\beta = \beta_0$  — точное решение системы уравнений (20);  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  — первое приближение этого решения, отличающееся от точного на некоторую малую величину  $h$  и  $k$  соответственно, т. е.  $\alpha_0 = \alpha_1 + h$ ,  $\beta_0 = \beta_1 + k$ . Для функций  $f_1(\alpha, \beta)$  и  $f_2(\alpha, \beta)$  можно написать разложение в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} f_1(\alpha_0, \beta_0) &= f_1(\alpha_1, \beta_1) + \\ &+ h \left( \frac{\partial f_1}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_1, \beta_1} + k \left( \frac{\partial f_1}{\partial \beta} \right)_{\alpha_1, \beta_1} + R(h, k) = 0, \\ f_2(\alpha_0, \beta_0) &= f_2(\alpha_1, \beta_1) + \\ &+ h \left( \frac{\partial f_2}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_1, \beta_1} + k \left( \frac{\partial f_2}{\partial \beta} \right)_{\alpha_1, \beta_1} + Q(h, k) = 0, \end{aligned}$$

Пренебрежем членами  $R$  и  $Q$  второго порядка малости по  $h$  и  $k$ .

Тогда можно найти приближение, лучшее, чем  $\alpha_1$  и  $\beta_1$ :

$$\alpha_2 = \alpha_1 + h_1, \beta_2 = \beta_1 + k_1,$$

где  $h_1$  и  $k_1$  определяются системой уравнений

$$\begin{aligned} h_1 \left( \frac{\partial f_1}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_1, \beta_1} + k_1 \left( \frac{\partial f_1}{\partial \beta} \right)_{\alpha_1, \beta_1} &= -f_1(\alpha_1, \beta_1), \\ h_1 \left( \frac{\partial f_2}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_1, \beta_1} + k_1 \left( \frac{\partial f_2}{\partial \beta} \right)_{\alpha_1, \beta_1} &= -f_2(\alpha_1, \beta_1), \end{aligned}$$

Теперь, найдя  $\alpha_2$  и  $\beta_2$ , можно вычислить следующее приближение и т. д.

В силу симметрии двухзеркальной антенны относительно плоскости сканирования (плоскости  $xOy$ ) фазовое распределение в раскрыве антенны будет также симметрично относительно этой плоскости. При этом формулы для вычисления параметров аппроксимирующей плоскости можно упростить.

Допустим, что смещение облучателя происходит всегда в плоскости  $xOy$ . Тогда аппроксимирующая плоскость будет параллельна оси  $z$ . В этом случае направляющий косинус нормали, проведенной из начала координат к плоскости, с осью  $z$  будет равен нулю:  $\cos \gamma = 0$  и  $\cos \beta = \sin \alpha$ . При этом аппроксимирующая плоскость будет определяться параметрами  $p$  и  $\alpha$ , которые можно определить по следующим формулам:

$$p = \frac{1}{N} \left[ \cos \alpha \sum_{n=1}^N x_n + \sin \alpha \sum_{n=1}^N y_n \right], \alpha = -\frac{1}{2} \arctg \frac{S_2}{S_6},$$

где

$$\begin{aligned} S_6 &= \frac{1}{2} \left[ \sum_{n=1}^N y_n^2 - \sum_{n=1}^N x_n^2 + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^N x_n \right)^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^N y_n \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

При определении этих параметров следует вначале определить  $\alpha$ , а затем  $p$ .

Среднеквадратическая величина отклонения реального волнового фронта от плоского определяется формулой

$$\Delta d = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d_n^2}.$$

Для целей оптимизации параметров данной сканирующей антенны можно использовать, например, градиентный метод. Предположим, что имеется некоторая функция качества  $\varphi$ , характеризующая параметры антенны. Пусть, она определяется уравнением

$$\varphi = \mu_1 f_1^2 + \mu_2 f_2^2 + \dots + \mu_M f_M^2.$$

Для простоты будем считать, что весовой коэффициент  $\mu_j$  содержится в функции  $f_j$ . Тогда

$$\varphi = f_1^2 + f_2^2 + \dots + f_M^2.$$

Здесь  $f_j$  — отдельная функция, представляющая частную абберацию или класс аббераций. Термин "абберация" в данном случае может обозначать или действительно абберации различного вида (сферическая абберация, кома и т. д.), или волновые абберации, т. е. отклонения реального волнового фронта от эталонного в различных его точках. В любом случае  $f_j$  является функцией параметров системы  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$ :

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_N), \\ f_2 &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_N), \\ &\dots \dots \dots \\ f_M &= f_M(x_1, x_2, \dots, x_N). \end{aligned} \right\}$$

Очевидно, задача оптимизации состоит в том, чтобы так выбрать независимые переменные  $x_N$ , что с их помощью функция  $\varphi$  будет сведена к минимуму. Однако, выбирая  $x_N$ , необходимо учитывать граничные условия. Они могут определяться некоторой системой неравенств

$$\left. \begin{aligned} B_1(x_1, x_2, \dots, x_N) &\geq 0, \\ B_2(x_1, x_2, \dots, x_N) &\geq 0, \\ &\dots \dots \dots \\ B_n(x_1, x_2, \dots, x_N) &\geq 0. \end{aligned} \right\}$$

Эти неравенства могут обозначать, например, что осевой размер не должен быть больше  $d = d_{\max}$ , вершинный отрезок  $M \geq M_{\max}$  (для зеркальных систем), коэффициент преломления  $n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$  и т. д.

Предположим далее, что  $A_{jk} = \partial f_j / \partial x_k$  является частной производной  $j$ -й функции  $f$  по переменной  $k$ . Ее можно вычислить дифференцированием или найти приближенно. Тогда все производные включает матрица

$$A = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{M1} & A_{M2} & \dots & A_{MN} \end{vmatrix},$$

которая справедлива для всех методов минимизации  $\varphi$ . В матрице  $M$  — количество аббераций,  $N$  — количество независимых переменных (обычно  $M < N$ ).

Частные производные  $\partial \varphi / \partial x_k$  представляют собой компоненты градиента  $\varphi$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_k} = \left( f_1 \frac{\partial f_1}{\partial x_k} + f_2 \frac{\partial f_2}{\partial x_k} + \dots + f_M \frac{\partial f_M}{\partial x_k} \right).$$

Полагая  $G_k = \frac{1}{2} \frac{\partial \varphi}{\partial x_k}$ , получаем

$$G_k = f_1 A_{1k} + f_2 A_{2k} + \dots + f_M A_{Mk}.$$

Введем еще матрицы-столбцы (векторы-столбцы):

$$\mathbf{x} \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{vmatrix}, \mathbf{f} \begin{vmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_M \end{vmatrix}, \mathbf{G} \begin{vmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_N \end{vmatrix}.$$

Вектор-столбец  $\mathbf{x}$  определяет точку в  $N$ -мерном пространстве. Каждый из компонентов вектора-столбца представляет собой параметр системы, так что каждая точка соответствует определенному расчету.

Вектор  $\mathbf{G}$  записывается так:  $\mathbf{G} = \frac{1}{2} \text{grad} \varphi$ . С учетом введенных обозначений можно написать матричное уравнение

$$\mathbf{G} = A^T \mathbf{f},$$

где  $A^T$  — транспонированная матрица.

Легко видеть, что вектор  $\mathbf{G} = 0$  в той точке, определяемой вектором  $\mathbf{x}$ , где функция  $\varphi$  имеет минимум.

В градиентном методе мы начинаем с произвольно взятой точки  $\mathbf{x}_0$  и определяем последовательность точек  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \dots$  следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_1 &= \mathbf{x}_0 + h_0 \mathbf{D}_0, \\ \mathbf{x}_2 &= \mathbf{x}_1 + h_1 \mathbf{D}_1, \\ &\dots \dots \dots \\ \mathbf{x}_{j+1} &= \mathbf{x}_j + h_j \mathbf{D}_j, \end{aligned} \right\}$$

где  $\mathbf{D}_0 = -\mathbf{G}_0, \mathbf{D}_1 = -\mathbf{G}_1, \dots, \mathbf{D}_j = -\mathbf{G}_j$ . Скаляры  $h_0, h_1, h_2$  выбираются так, чтобы удовлетворялись уравнения

$$\mathbf{D}_0^T \mathbf{G}_1 = \mathbf{D}_1^T \mathbf{G}_2 = \dots = \mathbf{D}_j^T \mathbf{G}_{j+1} = 0. \quad (21)$$

Здесь  $\mathbf{D}_j \mathbf{G}_{j+1}$  — скалярное произведение, а уравнение в целом устанавливает, что новый градиент  $\mathbf{G}_{j+1}$  перпендикулярен предыдущему вектору  $\mathbf{D}_j$ , поэтому их произведение равно нулю, т. е. необходимо вычислять градиент в каждой новой точке, а затем сделать шаг вдоль отрицательного градиента.

В случае линейных уравнений выбор  $h_j$  упрощается, так как может использоваться выражение

$$h_j = \mathbf{G}_j^2 / \mathbf{H}_j^2, \quad (22)$$

где  $\mathbf{H}_j = \mathbf{A}\mathbf{D}_j$ . Для этого случая проведем следующие преобразования. Выражение  $\mathbf{x}_{j+1} = \mathbf{x}_j + h\mathbf{D}_j$  умножим на матрицу  $\mathbf{A}$ . Если система линейна, т. е.  $\mathbf{f} = \mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \mathbf{f}_0$ , то можно написать  $\mathbf{A}(\mathbf{x}_{j+1} - \mathbf{x}_j) - \mathbf{f}_{j+1} - \mathbf{f}_j$ . Это дает  $\mathbf{f}_{j+1} - \mathbf{f}_j = h_j\mathbf{A}\mathbf{D}_j$ . Умножая на  $\mathbf{A}^T$  и используя уравнение  $\mathbf{G} = \mathbf{A}^T\mathbf{f}$ , получим

$$\mathbf{G}_{j+1} - \mathbf{G}_j = h_j\mathbf{A}^T\mathbf{A}\mathbf{D}_j.$$

Наконец, умножая на  $\mathbf{G}_j^T$ , имеем

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_j^T\mathbf{G}_{j+1} - \mathbf{D}_j^T\mathbf{G}_j &= \\ = h_j\mathbf{D}_j^T\mathbf{A}^T\mathbf{A}\mathbf{D}_j &= h_j(\mathbf{A}\mathbf{D}_j)^T(\mathbf{A}\mathbf{D}_j). \end{aligned} \quad (23)$$

Но  $\mathbf{D}_j^T\mathbf{G}_{j+1} = 0$  на основании уравнения (21), а также  $\mathbf{D}_j^T\mathbf{G}_j = \mathbf{G}_j^2$ . Поэтому уравнение (23) сводится к уравнению (22).

С учетом (22) уравнения (20) могут быть преобразованы к следующему виду:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1 &= \mathbf{x}_0 + h_0\mathbf{D}_0, \\ \mathbf{x}_2 &= \mathbf{x}_1 + h_1\mathbf{D}_1, \\ &\dots\dots\dots \\ \mathbf{x}_{j+1} &= \mathbf{x}_j + h_j\mathbf{D}_j, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_0 &= -\mathbf{G}_0, \\ \mathbf{D}_1 &= -\mathbf{G}_1 + (\mathbf{G}_1^2/\mathbf{G}_0)\mathbf{D}_0, \\ &\dots\dots\dots \\ \mathbf{D}_j &= -\mathbf{G}_j + (\mathbf{G}_j^2/\mathbf{G}_{j-1}^2)\mathbf{D}_{j-1}. \end{aligned}$$

Здесь также  $h_j$  выбираются так, что должны удовлетворяться уравнения

$$\mathbf{D}_0^T\mathbf{G}_1 = \mathbf{D}_1^T\mathbf{G}_2 = \dots = \mathbf{D}_j^T\mathbf{G}_{j+1} = 0.$$

Возможен также *метод наименьших квадратов*. Сущность этого метода состоит в следующем. Пусть имеется некоторое решение, соответствующее матрице aberrаций  $\mathbf{f}_0$ . Тогда небольшому изменению параметров соответствует новое  $\mathbf{f}$ :

$$\mathbf{f} = \mathbf{A}_x + \mathbf{f}_0.$$

Оно идентично уравнению линейной системы

$$\mathbf{f} = \mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \mathbf{f}_0.$$

Для минимизации функции качества  $\varphi$  требуется выбрать  $\mathbf{x}$  таким образом, чтобы градиент  $\mathbf{G}$  равнялся нулю. Преобразуем уравнение для  $\mathbf{G}$  с учетом того, что  $\mathbf{G} = \mathbf{A}^T\mathbf{f}$ :

$$\mathbf{G} = \mathbf{A}^T\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{G}_0. \quad (24)$$

После приравнивания  $\mathbf{G} = 0$  получим систему линейных уравнений, решаемых совместно, — систему нормальных уравнений наименьших

квадратов. Если же система нелинейна, то формальное решение можно записать в виде

$$\mathbf{x} = -(\mathbf{A}^T\mathbf{A})^{-1}\mathbf{G}_0.$$

Точка  $\mathbf{x}$  принимается за новое начало, производится вычисление функций и их производных и весь процесс повторяется снова. Полученная последовательность точек достаточно быстро сходится в одну, когда величина нелинейности мала. Однако если функции имеют ярко выраженную нелинейность, то результат будет расходиться в виде широких колебаний около минимума.

Чтобы ограничить эти колебания, вместо  $\varphi$  минимизируется другая функция  $\psi$ :

$$\psi = \varphi + P\mathbf{x}^T\mathbf{x} = \varphi + P(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2). \quad (25)$$

Произведение  $\mathbf{x}^T\mathbf{x}$  представляет собой квадрат расстояния между последовательными решениями. Скаляр  $P$  является коэффициентом затухания, выбранным для ускорения сходимости. Если он достаточно велик, то каждый последующий шаг уменьшается, и колебания также делаются меньше.

Для минимизации  $\psi$  процесс повторяется путем вычисления градиента и приравнивания его к нулю. Дифференцирование дает

$$\text{grad}\psi = \text{grad}\varphi + P\text{grad}(\mathbf{x}^T\mathbf{x}).$$

В уравнении (25)

$$\text{grad}(\mathbf{x}^T\mathbf{x}) = 2\mathbf{x}.$$

Учитывая, что  $\text{grad}\varphi = 2\mathbf{A}^T\mathbf{f}$ , получим

$$\frac{1}{2}\text{grad}\psi = \mathbf{A}^T\mathbf{f} + P\mathbf{x}. \quad (26)$$

Так как (26) получено для линейной аппроксимации, то, имея в виду, что  $\mathbf{f} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{f}_0$ , получим

$$\frac{1}{2}\text{grad}\psi = \mathbf{A}^T(\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{f}_0) + P\mathbf{x} = \mathbf{A}^T\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{G}_0 + P\mathbf{x}.$$

Приравняв  $\text{grad}\psi$  нулю, получим линейное уравнение

$$\mathbf{A}^T\mathbf{A}\mathbf{x} + P\mathbf{x} = -\mathbf{G}_0, \quad (27)$$

которое аналогично уравнению (24). Фактически уравнение (27) получается из уравнения (24) прибавлением скаляра  $P$  к каждому элементу, диагональному  $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$ .

Рассмотренные методы оптимизации параметров антенны оптического типа представляют собой достаточно мощный вычислительный аппарат, который может быть использован для решения задачи на оптимум. Причем, как следует из сущности градиентных методов, они наиболее пригодны для оптимизации системы по таким параметрам, которые представляют собой геометрические константы: осевые размеры, диаметры, координаты фокусов и т. д.

## КЛАССИЧЕСКИЕ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ

Базируясь на теории aberrаций и смежных положениях по исследованию процессов сканирования, перейдем теперь к конкретным антеннам. И начнем мы с простейших, классических систем, чтобы можно было понять, стоит ли искать новые пути и не достаточно ли использовать уже давно и хорошо изученные схемы.

Классической двухзеркальной системой является такая, в которой главное зеркало является параболоидом вращения. При этом вспомогательное зеркало может быть гиперболическим (схема Кассегрена), либо эллиптическим (схема Грегори). В схемах на рис. 259, 260 представлены

эти антенны с соответствующими системами координат. Для схемы Кассегрена используются соотношения: для вспомогательного зеркала

$x = a(\sqrt{1 - (y/b)^2} - 1)$ , где  $a = f_M/2\varepsilon$ ,  $b = a\sqrt{\varepsilon^2 - 1}$ ,  $a$  и  $b$  — полуоси гиперболы,  $\varepsilon$  — эксцентриситет,  $f_M$  — фокусное расстояние вспомогательного зеркала. Эквивалентное фокусное расстояние  $f_{\text{экв}} = f_{\text{гл}} \frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} = f_{\text{гл}}\beta$ , где  $\beta$  — увеличение антенны.

Для схемы Грегори используются соотношения: для вспомогательного зеркала  $[(x - c)^2/a^2] + y^2/b^2 = 1$ , где  $c = F_1F_2/2$ ;  $F_1A = a - c$ ;  $c = \sqrt{a^2 - b^2}$ . Антенна по схеме Грегори также может характеризоваться эквивалентным фокусным расстоянием  $f_{\text{экв}} = \frac{F_2A}{F_1A} f_{\text{гл}} = \beta f_{\text{гл}}$ .

В некоторых случаях используется совмещенный вариант Кассегрена и Грегори. На рис. 261 в схему Грегори добавлено гиперболическое зеркало для создания многофункциональной системы.

Так, на рис. 261, б показана схема антенны, пригодной для сканирования в некотором секторе углов с целью, например, поиска, а затем и определения точных координат цели. На рисунке помимо параболического (I) и гиперболического (II) зеркал введено зеркало (III), выполненное в виде сетки металлических проводов (пластин), а также система облучателей (IV). Можно предположить, что центральная группа облучателей работает на вертикальной поляризации

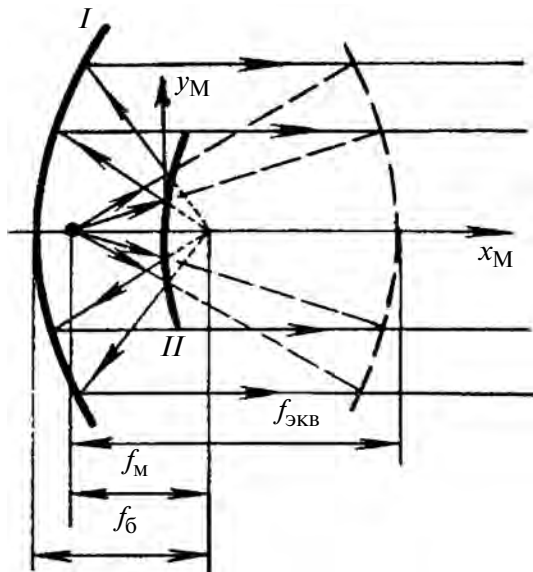


Рис. 259

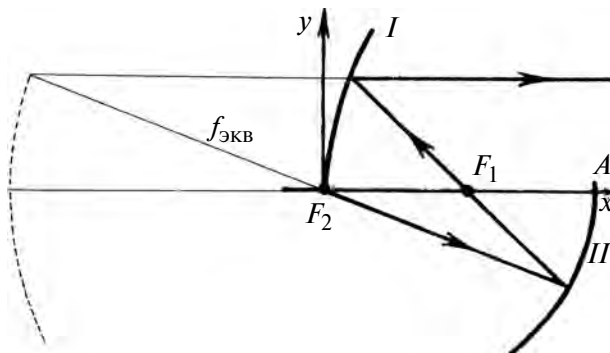


Рис. 260

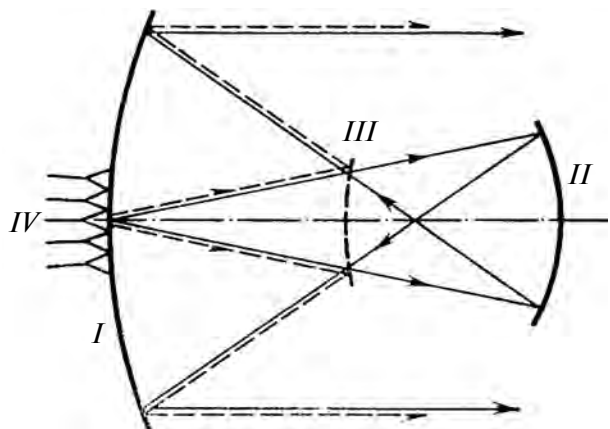


Рис. 261

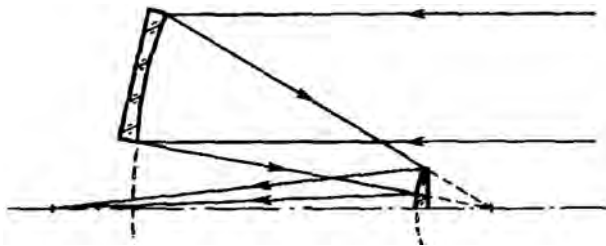


Рис. 262

в режиме пеленгации, а все вместе облучатели работают на горизонтальной поляризации в режиме сканирования.

Предположим далее, что зеркало III образовано из горизонтальных проводов (пластин). Тогда поле облучателей с вертикальной поляризацией через него пройдет и отразится от зеркала II, как в обычной антенне Грегори, а затем вновь пройдет через зеркало III и отразится от зеркала I. Поле облучателей с горизонтальной поляризацией отразится от зеркала III, а затем от зеркала I, как в антенне Кассегрена. Для пеленгации в этой антенне может использоваться моноимпульсный облучатель, а для сканирования — матрица рупорных облучателей.

Для уменьшения затеняющего действия вспомогательного зеркала можно использовать части главного и вспомогательного зеркала (рис. 262). Такая схема была предложена Форстером и Фричем в 1877 году (!!!) и получила название

брахитов. Об этом следовало бы знать современным изобретателям офсетных Кассегренов и Шварцшильдов [15].

В схемах Кассегрена и Грегори весьма важную роль играет положение точки фокуса по отношению к зеркалам, поскольку форма вспомогательного зеркала, а как следствие и сканирующие свойства антенны, зависят от положения фокуса, что иллюстрируется рисунком 263. Здесь правила знаков и система обозначений такие, как это принято в работе Д. Д. Максутава [1]. В схемах "а" и "б" вспомогательное зеркало B расположено перед фокусом зеркала A, а потому такие схемы называются предфокальными в отличие от схем зафокальных "в" и "г", где вспомогательное зеркало расположено за фокусом F. В схемах "а" и "б" вспомогательное зеркало удлиняет эквивалентные фокусные расстояния системы  $f_{\text{ЭКВ}}$  по сравнению с фокусным расстоянием главного зеркала  $f$ . Такие системы принято называть удлиняющими. В системах "в" и "г" происходит укорочение эквивалентного фокусного расстояния и система соответственно укорачивающая. На рис. 263 приняты также обозначения  $\alpha = \frac{f_0}{S_0}$  и  $\beta = \frac{S_0}{S'_0}$ , относящиеся к осевой

области. К этим понятиям мы еще обратимся, когда будем рассматривать апланатические системы. Отметим только, что отрезок  $S$  положителен для предфокальных схем и отрицателен

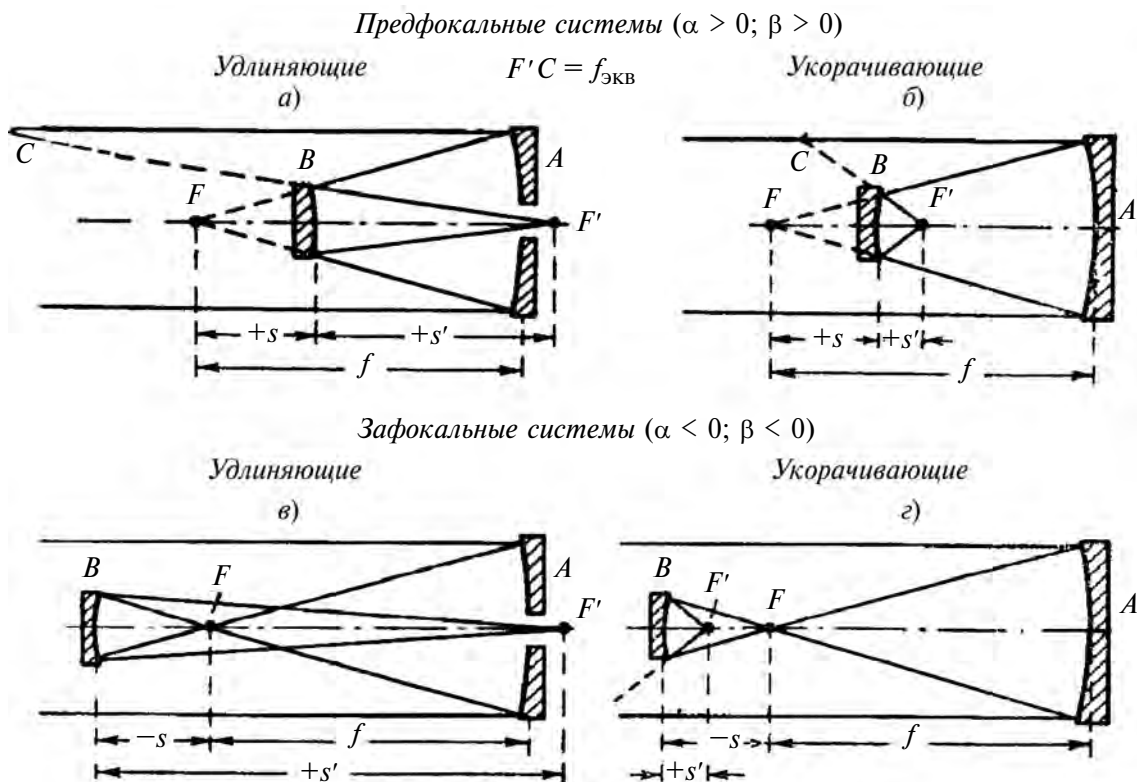


Рис. 263

для зафокальных схем — схем Грегори в классическом случае.

Классические двухзеркальные антенны в основном используются как антенны без сканирования, т. е. при расположении облучателя в фокусе. В таком режиме эти антенны широко распространены и практически полностью исследованы. В режиме сканирования они исследованы значительно меньше. Рассмотрим возможности сканирования антенны по схеме Кассегрена и сравним их в этом отношении с одиночным параболоидом. Для этого рассмотрим форму волнового фронта в антенне Кассегрена при сканировании. Пусть положение облучателя  $\Phi$  задается координатами  $\Phi_x, \Phi_y, \Phi_z$  — линейными смещениями его фазового центра  $\Phi$ , а положение гиперболического зеркала — координатами его вершины  $\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z$  и двумя углами поворота:  $\beta$  — в плоскости  $y_r O z_r$  (рис. 264) и  $\alpha$  — в плоскости  $x O z$ . Поворот в плоскости  $y O z$  осуществляется вокруг вертикальной оси, проходящей через вершину зеркала, а в плоскости  $x O z$  — вокруг горизонтальной оси, положение которой относительно вершины зеркала задано величиной  $h$ .

При определении фазового фронта в раскрытой антенне используется метод преобразования волновых фронтов, который устанавливает векторную зависимость между фронтом падающей волны ( $\mathbf{X}$ ), поверхностью отражателя ( $\mathbf{R}$ ) и фронтом отраженной волны ( $\mathbf{Y}$ ):

$$\mathbf{Y} = \mathbf{R} + (C - |\mathbf{R} - \mathbf{X}|)\xi, \quad (28)$$

где  $\xi$  — единичная нормаль к фронту отраженной волны, а  $C$  — константа, определяющая положение отраженного фронта в пространстве.

Очевидно, что уравнение для  $\mathbf{Y}$  должно быть решено дважды: при определении фронта волны, отраженной от малого и от большого зеркал. Первую задачу будем решать в системе координат смещенного гиперболического зеркала ( $x_r, y_r, z_r$ ),

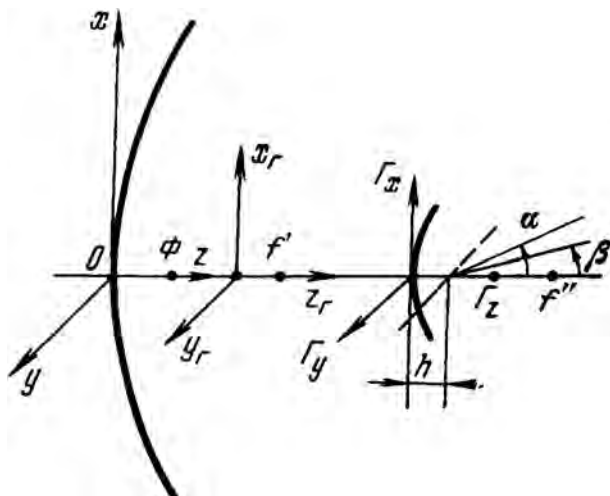


Рис. 264

так как уравнение его поверхности в этих осях будет иметь канонический вид и решение уравнения для  $\mathbf{Y}$  будет наиболее простым. Вторую задачу из тех же соображений будем решать в системе координат параболоида ( $x, y, z$ ).

Для простоты сферический фронт, падающий на гиперboloид, представим стянутым в точку  $\Phi$ , которая в невозмущенной антенне совпадает с фокусом гиперboloида  $f'$ :  $\mathbf{X} = -c\mathbf{k}$ , где  $c$  — половина фокусного расстояния гиперboloида. В возмущенной антенне уравнение для  $\mathbf{X}$  будет иметь вид

$$\mathbf{X} = x_3\mathbf{i} + y_3\mathbf{j} + z_3\mathbf{k},$$

где  $x_3, y_3, z_3$  — координаты фазового центра облучателя в системе координат  $x_r, y_r, z_r$  определяются следующими формулами:

$$x_3 = (\Phi_x - \Gamma_x)\cos\alpha - [\Phi_z - \Gamma_z - c - a - h]\sin\alpha,$$

$$y_3 = (\Phi_y - \Gamma_y)\cos\beta + [x_1\sin\alpha + z_1\cos\alpha + h]\sin\beta = \\ = (\Phi_y - \Gamma_y)\cos\beta + [(\Phi_x - \Gamma_x)\sin\alpha + \\ + (\Phi_z - \Gamma_z - c - a - h)\cos\alpha + h]\sin\beta,$$

$$z_3 = -(\Phi_y - \Gamma_y)\sin\beta + [(\Phi_x - \Gamma_x)\sin\alpha + \\ + [(\Phi_z - \Gamma_z - c - a - h)\cos\alpha + h]\cos\beta + a.$$

Заметим, что эти и последующие соотношения получены для систем с выпуклым гиперболическим зеркалом. Для использования их при расчете систем с вогнутым зеркалом необходимо параметр  $a$  (длина действительной полуоси гиперboloида) брать со знаком минус.

Обычно в подобных задачах определяют соответствие точек падающего фронта и отражателя. При задании фазового фронта, вырожденного в точку, следует найти соответствие между текущим лучом, из нее исходящим, и точкой падения луча на гиперboloид. Текущий луч зададим двумя угловыми координатами  $\gamma$  и  $\delta$ .

Направляющие косинусы падающего луча в системе  $x_r, y_r, z_r$  определим по формулам

$$V_{x_3} = \cos\delta\sin\delta\cos\alpha - \cos\gamma\sin\alpha,$$

$$V_{y_3} = \sin\delta\sin\gamma\cos\beta + \\ + (\cos\delta\sin\gamma\sin\alpha - \cos\alpha\cos\gamma)\sin\beta,$$

$$V_{z_3} = -\sin\delta\sin\gamma\sin\beta + \\ + (\cos\delta\sin\gamma\sin\alpha - \cos\alpha\cos\gamma)\cos\beta.$$

Решая совместно уравнение поверхности гиперboloида

$$\frac{z_r^2}{a^2} - \frac{x_r^2 + y_r^2}{b^2} = 1$$

и уравнение падающего луча, исходящего из точки ( $x_3, y_3, z_3$ ) с направляющими косинусами



$V_{x_3}, V_{y_3}, V_{z_3}$ , найдем координаты текущей точки на малом зеркале:

$$\begin{aligned} x_{\Gamma} &= \frac{V_{x_3}(z_{\Gamma} - z_3)}{V_{z_3}} + x_3, \quad y_{\Gamma} = \frac{V_{y_3}(z_{\Gamma} - z_3)}{V_{z_3}} + y_3, \\ z_{\Gamma} &= -\frac{B_{\Gamma} + \text{sign}(a)\sqrt{B_{\Gamma}^2 - A_{\Gamma}E_{\Gamma}}}{A_{\Gamma}}, \end{aligned} \quad (29)$$

где

$$A_{\Gamma} = c^2(V_{x_3}^2 + V_{y_3}^2) - b^2, \quad B_{\Gamma} = a^2(V_{x_3}k_1 + V_{y_3}k_2),$$

$$E_{\Gamma} = a^2(k_1^2 + k_2^2 + b^2V_{z_3});$$

здесь

$$k_1 = x_3V_{z_3} - z_3V_{x_3}, \quad k_2 = y_3V_{z_3} - z_3V_{y_3}.$$

Теперь можно определить  $\mathbf{R}$ , входящий в выражение для  $\mathbf{Y}$  (28):

$$\mathbf{R} = x_{\Gamma}\mathbf{i} + y_{\Gamma}\mathbf{j} + z_{\Gamma}\mathbf{k}, \quad (30)$$

а единичную нормаль к отраженному фронту, совпадающему по направлению с отраженным лучом, определим, используя закон Снеллиуса в векторной форме:

$$\xi_3 = \mathbf{V}_3 - 2(\eta\mathbf{V}_3)\eta_3, \quad (31)$$

где  $\eta_3$  — единичная нормаль к гиперboloиду в точке  $(x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, z_{\Gamma})$ , составляющие которой суть

$$\eta_{x_3} = -\frac{a^2x_{\Gamma}}{l}, \quad \eta_{y_3} = -\frac{a^2y_{\Gamma}}{l}, \quad \eta_{z_3} = -\frac{b^2z_{\Gamma}}{l}.$$

Здесь

$$l = \sqrt{a^4(x_{\Gamma}^2 + y_{\Gamma}^2) + b^4z_{\Gamma}^2}.$$

Проектируя вектор  $\xi_3$  на оси координат, получим:

$$\xi_{x_3} = V_{x_3} - P_1\eta_{x_3},$$

$$\xi_{y_3} = V_{y_3} - P_1\eta_{y_3},$$

$$\xi_{z_3} = V_{z_3} - P_1\eta_{z_3},$$

$$P_1 = 2(\eta_{x_3}V_{x_3} + \eta_{y_3}V_{y_3} + \eta_{z_3}V_{z_3}).$$

Подставим (29, 31) в (28) и представим вектор  $\mathbf{Y}$  в виде его проекции на оси координат  $x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, z_{\Gamma}$ :

$$\begin{aligned} Y_{x_3} &= x_{\Gamma} + \xi_{x_3}q, \\ Y_{y_3} &= y_{\Gamma} + \xi_{y_3}q, \\ Y_{z_3} &= z_{\Gamma} + \xi_{z_3}q, \end{aligned} \quad (32)$$

где

$$q = C - \sqrt{(x_3 - x_{\Gamma})^2 + (y_3 - y_{\Gamma})^2 + (z_3 - z_{\Gamma})^2}.$$

Полагая  $C = 2a$ , получим отраженный фронт, в общем случае расположенный вблизи фокуса гиперboloида  $f''$ , а в невозмущенной антенне — стянутый в точку, совпадающую с этим фокусом.

Итак, определен фронт, отраженный от малого зеркала, и можно перейти ко второй задаче, которую будем решать в системе координат параболоида. Для этого найденные  $\mathbf{Y}_3, \xi_3$  и  $x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, z_{\Gamma}$  необходимо пересчитать к осям  $x, y, z$ . Формулы преобразования для  $\mathbf{Y}$  имеют вид:

$$\begin{cases} Y_x = -Y_{z_1} \sin \psi_0 + Y_{x_1} \cos \psi_0 + c \sin \psi_0, \\ Y_y = Y_{y_1}, \\ Y_z = Y_{z_1} \cos \psi_0 + Y_{x_1} \sin \psi_0 + f - c \cos \psi_0; \end{cases} \quad (33)$$

$$\begin{cases} Y_{x_1} = -Y_{x_2} \cos \alpha + Y_{z_2} \sin \alpha + \Gamma_x, \\ Y_{y_1} = Y_{y_2} + \Gamma_y, \\ Y_{z_1} = -Y_{x_2} \sin \alpha + Y_{z_2} \cos \alpha + \Gamma_z + a + n_0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} Y_{z_2} = Y_{y_3} \sin \beta + (Y_{z_3} - a) \cos \beta - n_0, \\ Y_{x_2} = Y_{x_3}, \\ Y_{y_2} = Y_{y_3} \cos \beta - (Y_{z_3} - a) \sin \beta. \end{cases}$$

Формулы преобразования для  $\xi_3$  и  $x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, z_{\Gamma}$  можно написать по аналогии с (32).

Запишем уравнение (28) применительно ко второй задаче:

$$\mathbf{S} = \mathbf{R}_{\Pi} + (C_{\Pi} - |\mathbf{R}_{\Pi} - \mathbf{Y}|)\boldsymbol{\varepsilon}, \quad (34)$$

где  $\mathbf{Y}$  — фронт волны, падающий на параболоид и определенный формулами (32),  $\mathbf{R}_{\Pi}$  — радиус-вектор поверхности параболоида,  $\mathbf{S}$  — радиус-вектор поверхности отраженного фронта,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  — единичная нормаль к отраженному фронту.

Из множества фронтов, определяемых уравнением (34), выберем фронт, проходящий через точку пересечения параболоида с лучом, для которого  $\gamma = 0$ . Такой выбор обусловлен предположением, что обработка фронта, расположенного вблизи зеркала, даст наиболее точные результаты. Контрольные расчеты показали, что окончательные результаты практически не зависят от положения фронта в пределах от директрисы до фокуса параболоида ( $C_{\Pi} = 0 - 2f$ ).

Координаты точки на параболоиде определим, решая совместно уравнение его поверхности

сти  $z_{\Pi} = \frac{x_{\Pi}^2 + y_{\Pi}^2}{4f}$  и уравнение луча, исходящего

из точки  $x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma$  с направляющими косинусами  $\xi_x, \xi_y, \xi_z$ . В результате получим

$$\begin{cases} z_\Pi = \frac{\text{sign}(\varepsilon_z) \sqrt{B_\Pi^2 - A_\Pi B_\Pi} - B_\Pi}{A_\Pi}, \\ x_\Pi = \frac{\xi_x(z_\Pi - z_\Gamma)}{\xi_z} + x_\Gamma, y_\Pi = \frac{\xi_y(z_\Pi - z_\Gamma)}{\xi_z} + y_\Gamma, \end{cases} \quad (35)$$

где

$$A_\Pi = \xi_x^2 + \xi_y^2, \quad B_\Pi = \xi_x l_1 + \xi_y l_2 - 2f \xi_z^2, \\ E_\Pi = l_1^2 + l_2^2, \quad l_1 = x_\Gamma \xi_z - z_\Gamma \xi_x, \quad l_2 = y_\Gamma \xi_z - z_\Gamma \xi_y.$$

В формулах (35) возможна неопределенность, раскрывая которую получим

$$x_\Pi = x_\Gamma, \quad y_\Pi = y_\Gamma, \quad z_\Pi = (x_\Pi^2 + y_\Pi^2)/4f \\ \text{при } \xi_x = \xi_y = 0,$$

$$x_\Pi = 2f \xi_x, \quad y_\Pi = 2f \xi_y, \quad z_\Pi = 2f \text{ при } \xi_z = 0.$$

Поверхность параболоида определим в виде

$$\mathbf{R}_\Pi = x_\Pi \mathbf{i} + y_\Pi \mathbf{j} + z_\Pi \mathbf{k}. \quad (36)$$

Единичная нормаль к отраженному фронту (е) совпадает с отраженным лучом, направление которого определим, используя закон Снеллиуса

$$\varepsilon_x = \xi_x - n_x a_2, \quad \varepsilon_y = \xi_y - n_y a_2, \quad \varepsilon_z = \xi_z - n_z a_2, \quad (37)$$

где

$$a_2 = 2(n_x \xi_x + n_y \xi_y + n_z \xi_z),$$

а  $n_x, n_y, n_z$  — проекции единичной нормали к параболоиду в точке падения луча, равные

$$\begin{cases} n_x = x_n/n_1, \quad n_y = y_n/n_1, \quad n_z = -2f/n_1, \\ n_1 = \sqrt{x_\Pi^2 + y_\Pi^2 + 4f^2}. \end{cases} \quad (38)$$

Подставляя (33), (36) и (37) в (34), получим для  $\mathbf{S}(x_\Phi, y_\Phi, z_\Phi)$

$$x_\Phi = x_\Pi + \varepsilon_x b_1, \quad y_\Phi = y_\Pi + \varepsilon_y b_1, \quad z_\Phi = z_\Pi + \varepsilon_z b_1, \quad (39)$$

где

$$b_1 = C_\Pi - \sqrt{(x_\Pi - Y_x)^2 + (y_\Pi - Y_y)^2 + (z_\Pi - Y_z)^2},$$

$$C_\Pi = \sqrt{(x_\Pi - Y_x)^2 + (y_\Pi - Y_y)^2 + (z_\Pi - Y_z)^2} \\ \text{при } \gamma = 0.$$

Расчет по приведенным формулам позволяет определить структуру лучей в режиме приема для того, чтобы оценить характер aberrаций в антенне, построенной по классической схеме Кассегрена и сравнить полученный результат с aberrациями одиночного параболического зеркала. На рис. 256, 257 представлена структура лучей в параболическом зеркале и в двухзеркальной антенне с гиперболическим вспомогательным зеркалом. Удивляет практически полная идентичность этих структур, что свидетельствует о том, что характер и величина aberrаций в этих антеннах таковы, что делает антенну по схеме Кассегрена бесперспективной в плане создания на ее базе сканирующей антенны.

# АПЛАНАТИЧЕСКИЕ ЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ. АПЛАНАТЫ ПО Д. Д. МАКСУТОВУ

Обычно считается, что апланатическая антенна это такая антенна, в которой выполняется условие синусов Аббе и именно поэтому в ней отсутствует aberrация третьего порядка кома и поэтому она используется для широкоугольного сканирования. Тем самым предполагается, что условие синусов это есть условие исправления конкретно aberrации комы. Между тем, при выводе условия синусов (см. раздел "Теория aberrаций") ни слова не говорится о такой aberrации как кома и вообще не идет речь о какой-либо aberrации — просто требуется, чтобы **резко** изображалась не только точно на оси системы, но и рядом расположенная точка. Между тем **резкое** изображение внеосевой точки это есть отсутствие вообще всякой aberrации, т. к. наличие хотя бы одной какой-либо aberrации уже исключает возможность резкого изображения. Складывается впечатление, что фактическое устранение именно комы при выполнении условия синусов произошло само собой — неожиданно для авторов этого условия. Кстати, как показано дальше, в некоторых вариантах разработанных нами апланатических антенн оказываются существенно исправленным и астigmatизм, и даже кривизна поля при очень большом угле сканирования — вплоть до  $\pm 45^\circ$ . Так, если сравнить структуру лучей в области фокуса параболоида (рис. 256) и структур лучей на рис. 295, то легко видеть, что в данной апланатической антенне практически есть только минимальная сферическая aberrация, полностью отсутствует кома, а фокальная кривая — практически прямая линия, т. е. мы получили "идеальную" сканирующую антенну (!), в которой на практике реализовано заложенное при выводе условия синусов требование **резкого** изображения внеосевой точки.

Следует обратить внимание на одно важное следствие строгого выполнения условия синусов, а именно, на специфику профилей зеркал апланатической антенны — зеркала могут иметь двойную кривизну. Это не является препятствием для их реализации, по крайней мере, в см-диапазоне волн. Другое дело в оптике, здесь на первый план выходят проблемы возможности изготовления и контроля формы поверхности зеркал: во главу угла ставится проблема асферичности, т. е. необходимо использовать только такие поверхности, которые минимально возможно от-

личаются от сферических и ни о каких зеркалах двойной кривизны не может быть и речи.

Таким образом, создается впечатление, что условие синусов Аббе в строгом виде не может быть использовано в зеркальных телескопах и нуждается в переосмыслении и коррекции. Такая коррекция была произведена Д. Д. Максуповым, который создал теорию именно двухзеркальных апланатических телескопов. Причем, особенно это подчеркнем, он считал, что апланатическими являются именно и только такие системы, в которых отсутствуют искажения при осевом положении луча и исправленная кома при отклонении луча. Только кома! Другие aberrации могут регулироваться путем подбора свободных параметров. В основе методики Максупова лежит понятие о коэффициенте комы, для которого им получена формула

$$K_{II} = \frac{1 - 2\beta^2 - \alpha + I_1^2(\alpha - 1)}{8\beta^2}.$$

Здесь  $e_1$  — эксцентриситет главного зеркала: при  $e_1 = 1$  главное зеркало — параболоид; при  $e_1 > 1$  главное зеркало — гиперболоид; при  $e_1 < 1$  — эллипсоид; при  $e_1 = 0$  — сфера. Значения  $\beta$  и  $\alpha$  определяют геометрические параметры системы зеркал, показанные на рис. 265  $\alpha = \frac{f_0}{S_0}$  и  $\beta = \frac{S_0}{S'_0}$ ,

где нулевые значения соответствуют осевым значениям соответствующих размеров  $S$ ,  $S'$  и  $f$ .

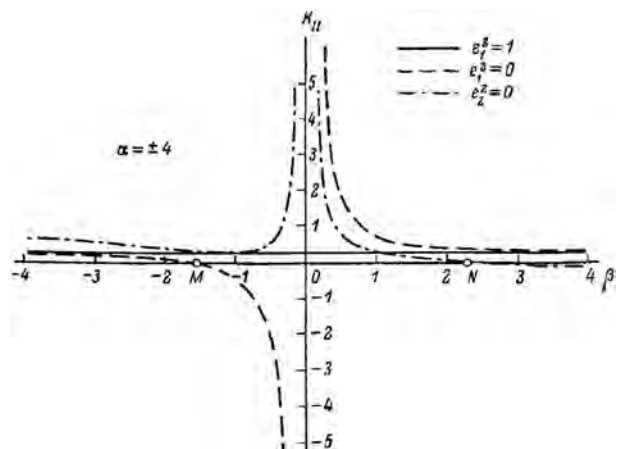


Рис. 265

Условие апланатической зеркальной системы выполняется, конечно, в первом приближении, если  $K_{II}$  равно нулю. В этом случае  $e_1^2 = 1 + \frac{2\beta^2}{\alpha - 1}$ .

Эксцентриситет  $e_1^2$  (рис. 265) может быть равен единице, а главное зеркало иметь параболическую форму лишь в одном случае, когда  $\beta = 0$ , что непригодно для визуальных телескопов. Поэтому в апланатическом телескопе главное зеркало может иметь поверхность формы любого **конического** сечения, но только не параболоида. Приняв  $\alpha = \pm 4$  (соотношение диаметров зеркал), на рис. 265 представлены зависимости  $e_1^2$  и  $e_2^2$  апланатического телескопа ( $e_2$  — эксцентриситет вспомогательного зеркала), для всех возможных схем, представленных ранее на рис. 263. Рассмотрим подробнее основные схемы. Хронологически первой (1905 год) была схема Шварцшильда, показанная на рис. 266, а, и не нашедшая практического применения. Здесь представлена укорачивающая предфокальная система, фокус которой далеко вдвинут в сторону вспомогательного зеркала. Оба зеркала имеют **гиперболиче-**

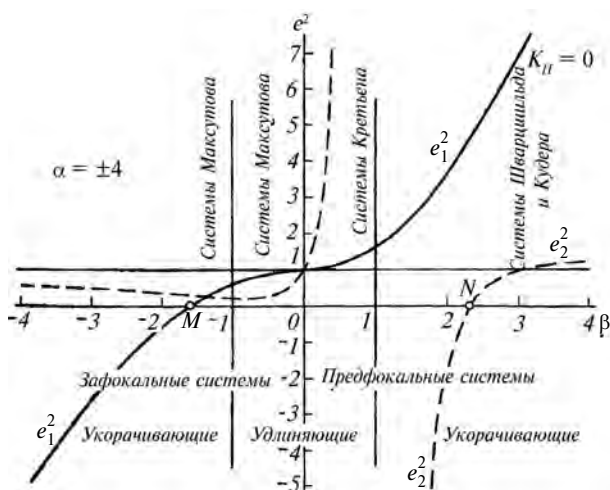


Рис. 266

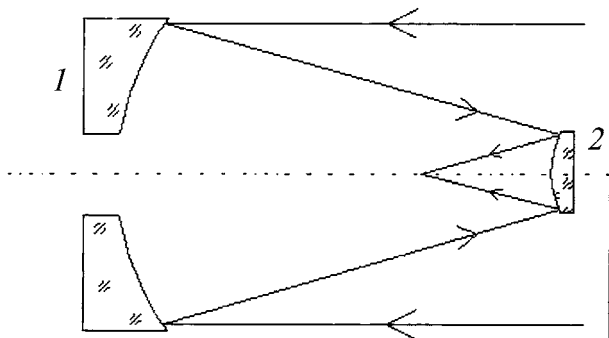


Рис. 266, а

**скую** форму (NB!), причем расстояние между зеркалами должно быть в два раза больше фокусного расстояния. На рис. 120 показана схема телескопа Ричи—Кретьена, предложенная в 1920 году. Схема предфокальная удлиняющая, форма зеркал — гиперboloиды. Зеркальная схема телескопа Максудова имеет главное зеркало в виде вогнутого эллипсоида, а вспомогательное зеркало — сфера. Схема Максудова с мениском показана на рис. 121. Из приведенных схем апланатических телескопов самой несовершенной и конструктивно неудобной является схема Шварцшильда. Таким образом: 1) схема Шварцшильда состоит из 2-х гиперболических зеркал; 2) фокус далеко вдвинут в промежуток между зеркалами таково реальное положение с "телескопом" Шварцшильда, поэтому говорить об апланатических антеннах как об антеннах Шварцшильда, дублирующих схему его телескопа, есть не более как историческое недоразумение. Поэтому справедлив только один адекватный термин — апланатические антенны, а какие именно — зависит от конструкции. Все схемы двухзеркальных апланатических телескопов, начиная с 1905 года, укладываются в общую теорию телескопов Максудова.

Наибольшее распространение в практике создания телескопов получила схема апланатического телескопа Ричи—Кретьена: было построено по крайней мере четыре больших телескопа [16] с диаметром главного зеркала около 4-х метров и целый ряд телескопов диаметром 2—2,5 метра. Проектируется серия телескопов по схеме Ричи—Кретьена и ни один телескоп по схеме Шварцшильда! Так что гораздо справедливее будет говорить не об антеннах Шварцшильда, а об антеннах по схеме Ричи—Кретьена — если есть такое желание.

Следует особенно подчеркнуть, что приведенные рассуждения имеют далеко не праздный характер: используя хорошо забытое старое, можно с помощью методики советского ученого Максудова создать новую схему сканирующих радиотелескопов или следящих антенн для систем спутниковой связи, используя двухзеркальные антенны на основе простых конических сечений, простых в изготовлении и достаточно просто контролируемых. О необходимости создания таких антенн так красноречиво говорил Б. А. Попереченко в своей статье "Большие зеркальные антенны" в сборнике "Проблемы антенной техники".

Оставляя реализацию апланатических радиотелескопов по методике Максудова последующим поколениям, обратимся к исследованию апланатов, строго удовлетворяющих условию синусов первоначально в осесимметричном исполнении.

## АПЛАНАТЫ ПО Э. АББЕ. ТОЧНЫЕ ФОРМУЛЫ

Как мы видим из предыдущего материала, ни один из оптических апланатических телескопов не может быть прямым аналогом апланатических антенн, а тем более никогда не существовавший "телескоп" Шварцшильда. Разработчик антенных апланатов в отличие от разработчиков оптических телескопов не связан с ограничением на выбор формы зеркал (только коникоиды и все!): антенные зеркала могут иметь и двойную кривизну. Поэтому мы будем пользоваться строгим выполнением условия синусов и точными формулами для расчета зеркал.

Пусть на рисунке 267 показано главное (*I*) и вспомогательное (*II*) зеркала и облучатель в точке *O*, расстояние которого от главного зеркала будем называть фокальным отрезком. Фокальный отрезок "*M*" будем считать положительным, если облучатель находится между зеркалами, и отрицательным, если он располагается левее главного зеркала.

Точки пересечения продолжений лучей источника и соответствующих коллимированных (параллельных) лучей образуют характеристическую кривую антенны (*III*). У апланатических антенн в соответствии с условием синусов эта кривая — окружность, радиус которой является фокусным расстоянием ( $OA = f$ ) антенны.

Расчет профилей зеркал апланатической антенны можно вести в такой последовательности:

1) запишем условие получения плоского фронта в раскрыве ( $M = 0$ ):

$$r + l + s = 3d,$$

где  $d$  — расстояние между зеркалами;

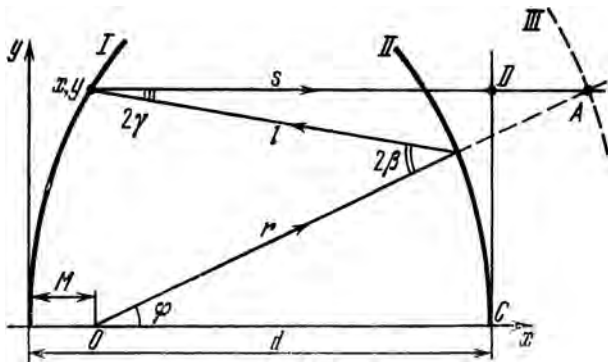


Рис. 267

2) найдем проекции отрезков лучей на оси координат:

$$r \sin \varphi + l \sin 2\gamma = y,$$

$$r \cos \varphi - l \cos 2\gamma = x;$$

3) соотношение между углами

$$2\gamma = 2\beta - \varphi;$$

4) уравнение нормали к вспомогательному зеркалу

$$\frac{1}{r} \frac{dr}{d\varphi} = \operatorname{tg} \beta,$$

и условие апланатизма

$$y = f \sin \varphi.$$

Преобразуя эти выражения, получим

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{f \sin \varphi - r \sin \varphi}{2d - r(1 - \cos \varphi)}, \quad l = \frac{2d - r(1 - \cos \varphi)}{1 + \cos 2\gamma},$$

$$\frac{1}{r} \frac{dr}{d\varphi} = \frac{f \sin \varphi + 2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} (d - r)}{2 \left( d - f \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right)}.$$

Последнее соотношение есть дифференциальное уравнение вспомогательного зеркала, для решения которого необходимо учесть начальное условие: при  $\varphi = 0$   $r = d$ . Тогда, полагая для общности, что  $M \neq 0$ , получим

$$r = \frac{(d - M) \left( \cos \frac{\varphi}{2} \right)^{2d(f-d)}}{\sin^2 \frac{\varphi}{2} \left( \cos \frac{\varphi}{2} \right)^{2d(f-d)} + \left( 1 - \frac{f}{d} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right)^{f/(f-d)},}$$

а уравнение главного зеркала выразим в прямоугольных координатах:

$$x = \frac{4d(r-d) + f \sin^2 \varphi (f-2r)}{2[2d - r(1 - \cos \varphi)]} + M,$$

$$y = f \sin \varphi.$$

Для зафокальной апланатической антенны можно получить аналогичную систему уравнений:

$$r + l + s = 3d,$$

$$r \sin \varphi + f \sin \varphi = l \sin 2\gamma$$

$$-r \cos \varphi + l \cos 2\gamma = x$$

$$2\gamma = \beta + \varphi$$

$$y = f \sin \varphi, \quad \frac{1}{r} \frac{dr}{d\varphi} = \operatorname{tg} \beta.$$

Произведя преобразование, получим дифференциальное уравнение вспомогательного зеркала

$$l = \frac{2d - r(1 - \cos\varphi)}{1 + \cos 2\gamma},$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\sin \varphi + 2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} (r - d)}{2d - r(1 - \cos \varphi)},$$

$$\frac{1}{r} \frac{dr}{d\varphi} = \frac{\sin \varphi (r + f)}{2 \left( d + f \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right)}.$$

Уравнение главного зеркала, как и в предыдущей схеме, можно получить в прямоугольных координатах.

Поскольку наибольший практический интерес представляют апланаты по предфокальной схеме, исследуем первоначально, какую форму могут принимать зеркала, рассчитанные по полученным формулам. На рис. 268 показано изменение формы зеркал в области оси в зависимости от расстояния между зеркалами; видно, что вспомогательное зеркало изменяет свою форму от выпуклой до вогнутой. На рис. 269 показана зависимость формы зеркал от фокусного расстояния при постоянном осевом размере. Наибольший интерес представляет обобщенный рисунок 270, на котором показано все возможное семейство апланатов, строго выполняющих условие синусов. Здесь зафиксирован осевой размер  $d$  и фокальный отрезок  $M = 0$ . Изменяются только фокусные расстояния.

Видно, что зеркала могут весьма существенно отличаться по форме своих поверхностей и в некоторой области происходит пересечение главного и вспомогательного зеркал. Все точки пересечения главного и вспомогательного зеркал, определяющие максимальный размер антенны, должны располагаться на параболе, фокусное расстояние которой  $F = d$ . Действительно, полагая (рис. 271), что плоский фронт  $AD$  прохо-

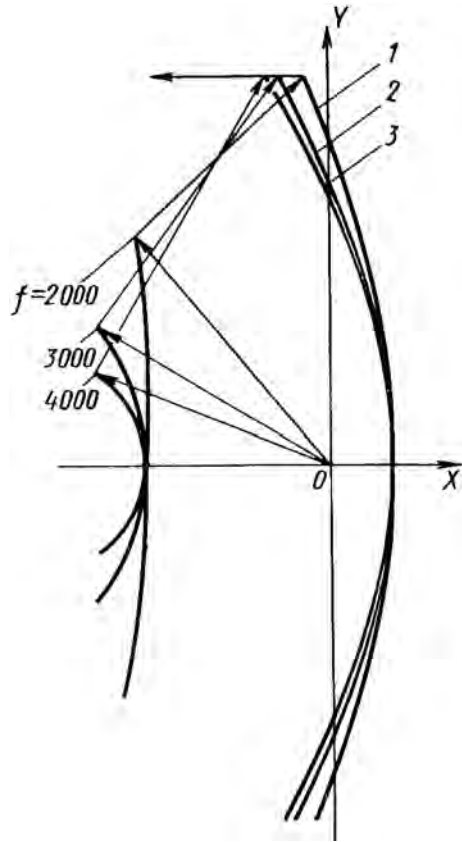


Рис. 269

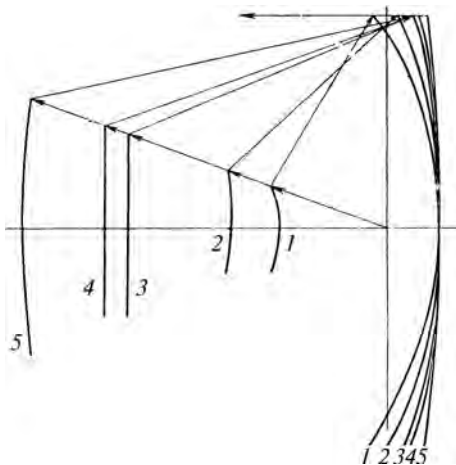


Рис. 268

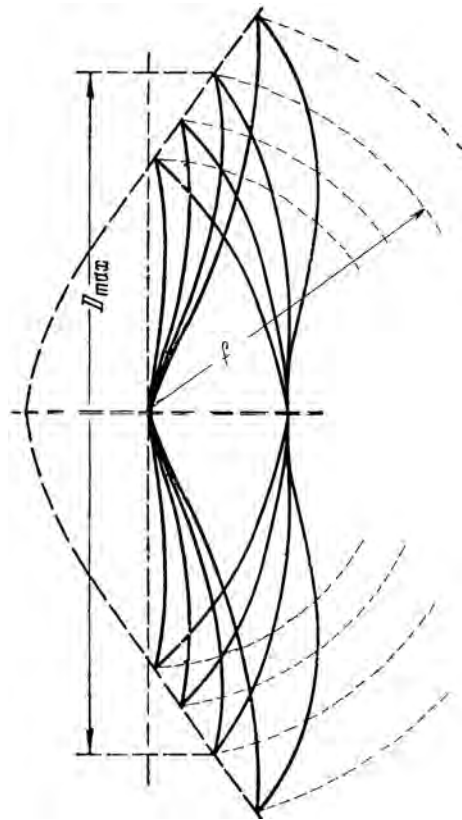


Рис. 270

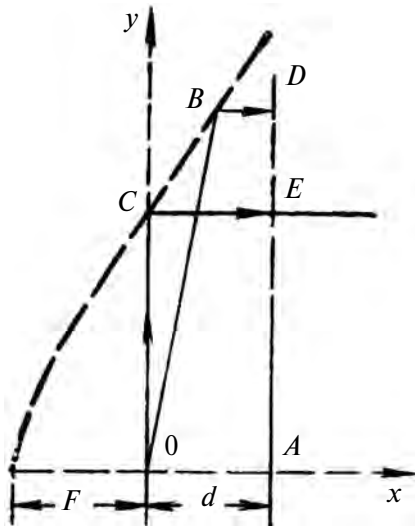


Рис. 271

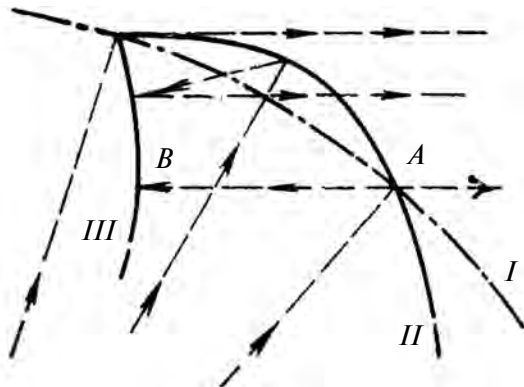


Рис. 272

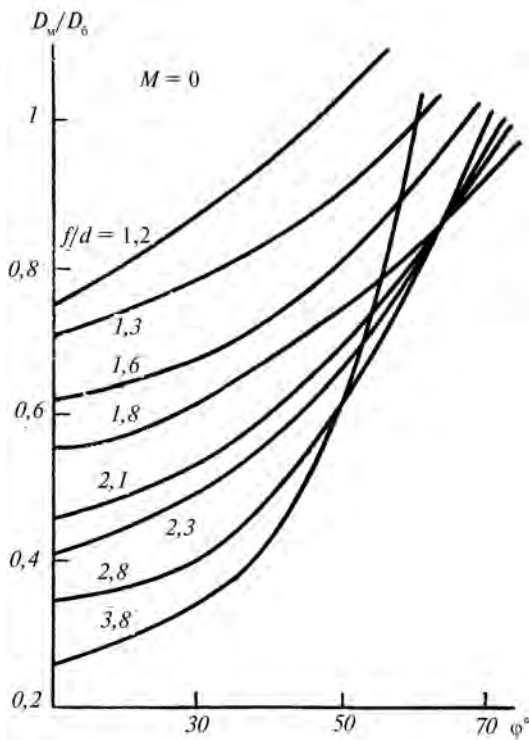


Рис. 273

дит через вершину вспомогательного зеркала — точку  $A$ , можно записать:

$$OC + CE = 3d,$$

т. е.

$$OC + d = 3d, OC = 2F = 2d, F = d.$$

Для произвольной точки  $B$  на параболе имеем

$$y^2 = 4dx, y^2 + (x - d)^2 = f^2.$$

Отсюда получаем:  $D_{\max} = 2y_B = 4\sqrt{d} \sqrt{f - d}$ , причем это соотношение справедливо только при  $f \geq 2d$ .

Если  $f < 2d$ , то профили зеркал не пересекаются и диаметр антенны будет определяться размером уже не главного, а вспомогательного зеркала. На рис. 272 показана область зеркал вблизи точки пересечения; видно, что окружность  $I$  радиуса  $f$  пересекает вспомогательное зеркало  $II$  в точке  $A$ , и в силу этого лучу  $AB$  соответствует вертикальная касательная к главному зеркалу  $III$ . Лучи, отражающиеся от главного зеркала выше точки  $B$ , проходят таким образом, что  $r \sin \phi > f \sin \phi$ , в результате чего касательная к главному зеркалу выше точки  $B$  наклонена влево: зеркало имеет переменную кривизну, а диаметр вспомогательного зеркала оказывается больше, чем диаметр главного.

Обычно в апланатических антеннах размеры зеркал выбираются таким образом, чтобы область пересечения зеркал была исключена, так как она

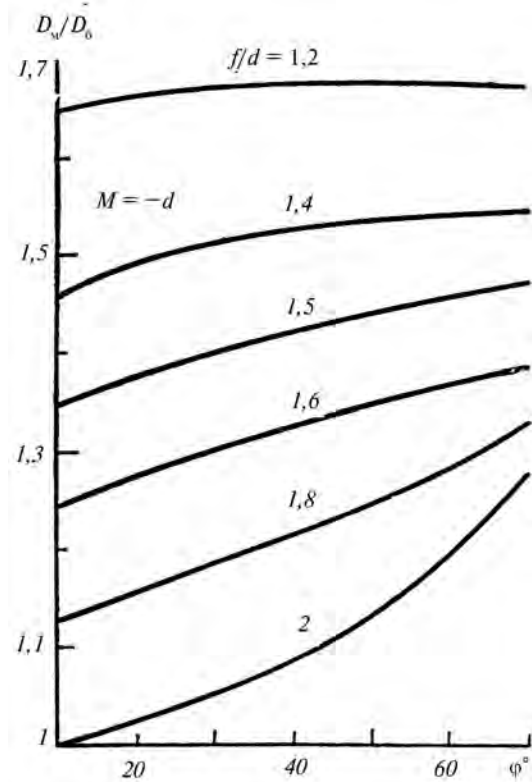


Рис. 274

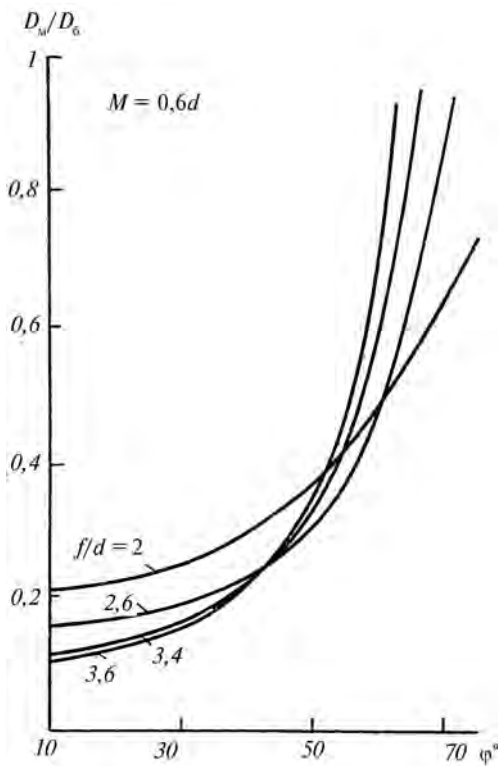


Рис. 275

имеет значительную кривизну и при сканировании возникают большие искажения структуры поля.

Соотношение между диаметрами вспомогательного (малого) и главного (большого) зеркала можно выразить в следующем виде:

$$\frac{D_M}{D_0} = \frac{r \sin \varphi}{f \sin \varphi} = \frac{(d - M) \left( \cos \frac{\varphi}{2} \right)^{2d/(f-d)}}{f \sin^2 \frac{\varphi}{2} \left( \cos \frac{\varphi}{2} \right)^{2d/(f-d)} + \left( 1 - \frac{f}{d} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right)^{f/(f-d)}}.$$

На рис. 273—275 показаны графики зависимости отношения  $D_M/D_0$  от половины апертурного угла для разных  $f/d$  и  $M$ . Видно, что чем больше  $f/d$ , тем сильнее отличаются размеры зеркал ( $D_0 > D_M$ ), но вблизи точек пересечения эта закономерность нарушается и  $D_0$  оказывается равным и даже меньше, чем  $D_M$ .

Если  $M \neq 0$ , то характер соотношения  $D_M/D_0$  зависит от знака фокального отрезка: диаметр главного зеркала ( $D_0$ ) сильнее отличается от диаметра вспомогательного зеркала ( $D_M$ ), если  $M > 0$ .



## АПЛАНАТЫ КАК СКАНИРУЮЩИЕ АНТЕННЫ. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Любая зеркальная антенна, также как и оптическая система, могут использоваться для передачи и приема информации как в главном направлении, так и в некоторой области углов в стороне от главного направления. В оптических телескопах желательнее получить неискаженные изображения протяженных объектов, а в антеннах — осуществлять сканирование ДН в некоторой угловой области с минимальными искажениями. Изучение антенны с фиксированным направлением ДН не является целью настоящей работы, поэтому основное внимание будет уделяться сканирующим антеннам в наиболее перспективном исполнении.

Поскольку апланатические антенны — это сканирующие антенны, логично исследовать их в этом плане. Как видно из рис. 270, форма главного и вспомогательного зеркал сложна и необычна и конечно невозможно заранее предсказать, какая конкретно антенна может быть пригодна для решения конкретных задач, поскольку пришлось бы анализировать влияние сразу четырех параметров — диаметра, фокусного расстояния, фокального отрезка и осевого размера антенны.

Самый наглядный метод, дающий практически полную информацию о сканирующих возможностях той или иной зеркальной антенны, состоит в анализе структуры лучей и формы волновых фронтов — геометро-оптический метод. По размерам и структуре пучка лучей в области фокуса можно судить о характере и величине aberrаций для данного угла сканирования, а также о потере отражающих поверхностей. Исследуя структуру лучей, можно выбрать наиболее оптимальный вариант антенны в соответствии с заданными требованиями, а на заключительном этапе уже можно производить уточняющий расчет ДН. Так, по структуре лучей, особенно трехмерной, можно сразу сказать с достаточной точностью, где следует располагать облучатель для данного угла сканирования. При этом совершенно не обязательно сразу и целиком рассчитывать ход лучей на ЭВМ: часто бывает достаточно произвести графическое построение с помощью линейки и циркуля по методике, изложенной выше. Для предварительного анализа нами предложен метод двух лучей.

На рис. 276 и 277 показана часть двухзеркальной антенны, близкая к ее оси, и источник, вынесенный из фокуса в точку  $M$  с координатами

$A$  и  $t$ , причем на рис. 276 источник располагается на поверхности главного зеркала, а на рис. 277 — в произвольной точке.

Два контрольных луча выбраны следующим образом: луч  $MNBC$  выбран так, чтобы после отражения от вспомогательного зеркала он попадал в вершину главного, а луч  $MEFG$  направлен

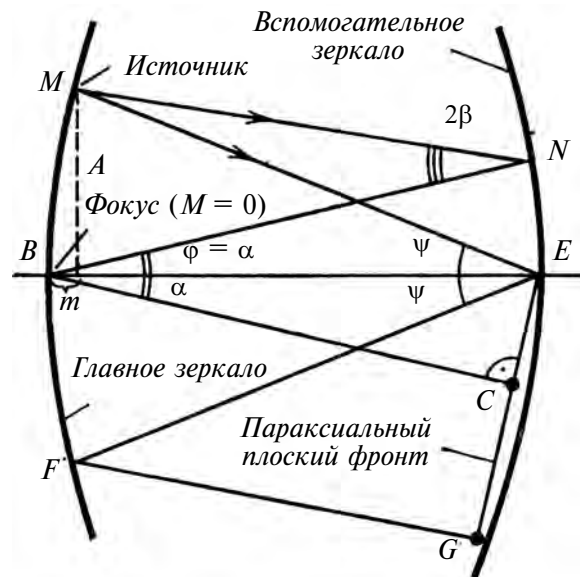


Рис. 276

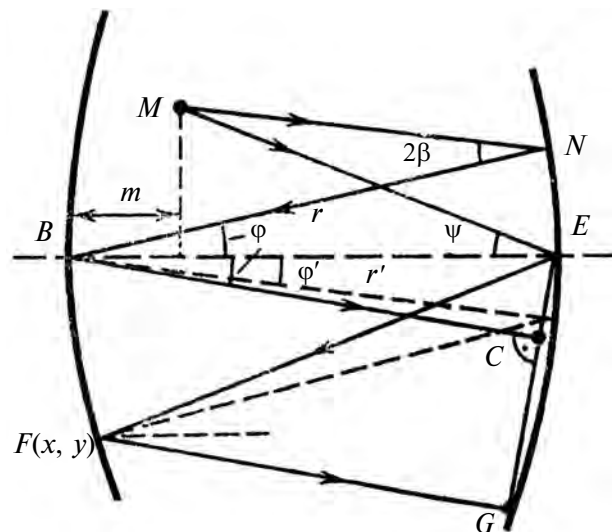


Рис. 277

в вершину вспомогательного зеркала. Эталонный плоский фронт проведен через точку  $E$  перпендикулярно лучу  $BC$ . Очевидно, что луч  $FG$  в общем случае не должен быть перпендикулярен следу этого фронта  $EG$ , и поэтому по величине угла  $FGE$  можно судить о величине искажений в параксиальной области.

Чтобы луч  $MNBC$  попал в точку  $B$ , необходимо найти координаты  $r$  и  $\varphi$  соответствующей точки на вспомогательном зеркале, для чего надо решить следующую систему уравнений:

$$r \sin \varphi + (r \cos \varphi - m) \operatorname{tg}(2\beta - \varphi) = A, \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{1}{r} \frac{dr}{d\varphi},$$

$$r = \frac{d \left( \cos \frac{\varphi}{2} \right)^{2d/(f-d)}}{\sin^2 \frac{\varphi}{2} \left( \cos \frac{\varphi}{2} \right)^{2d/(f-d)} + \left( 1 - \frac{f}{d} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right)^{f/(f-d)}}.$$

Здесь осевой размер антенны  $d$  и фокусное расстояние  $f$  заданы.

Чтобы определить координаты  $x$ ,  $y$  точки  $F$ , необходимо решить следующую систему:

$$(d - x) \operatorname{tg} \psi = y,$$

$$x = \frac{4d(r' - d) + (f - 2r')f \sin^2 \varphi'}{2[2d - r'(1 - \cos \varphi')]},$$

$$r' = \frac{d \left( \cos \frac{\varphi'}{2} \right)^{2d/(f-d)}}{\sin^2 \frac{\varphi'}{2} \left( \cos \frac{\varphi'}{2} \right)^{2d/(f-d)} + \left( 1 - \frac{f}{d} \sin^2 \frac{\varphi'}{2} \right)^{f/(f-d)}},$$

$$y = f \sin \varphi', \quad \psi = \operatorname{arctg} \left( \frac{A}{d - m} \right).$$

Теперь можно определить величину угла  $FGE$ :

$$\angle FGE = 90^\circ - \varphi + 2\gamma - \psi,$$

$$\text{где } \gamma = \operatorname{arctg} \frac{(f - r') \sin \varphi'}{2d - r'(1 - \cos \varphi')}.$$

На рис. 278 представлены графики зависимости величины угла  $FGE$  от угла  $\varphi$  ( $= \alpha$ ) для различных значений отношения  $f/d$ . Очевидно, увеличение угла  $\varphi$  эквивалентно увеличению угла сканирования  $\alpha$ , так как угол фронта  $GE$  с вертикалью равен углу  $\varphi = \alpha$ . На рис. 278 видно, что отклонение угла  $FGE$  от  $90^\circ$  зависит от отношения  $f/d$  и наименьшие искажения имеют антенны с отношением  $f/d = 0,8 - 1,1$ .

Особенностью апланатических антенн является то, что зависимость между отклонением диаграммы направленности и положением облучателя неоднозначна: одно и то же направление максимума диаграммы может быть получено при разных положениях облучателя, но при этом искажения формы диаграммы направленности будут различными. Для предварительной

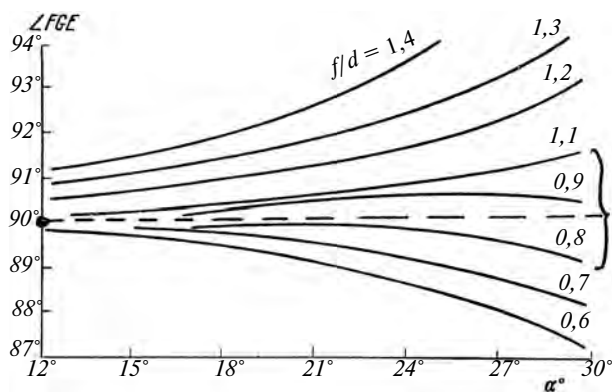


Рис. 278

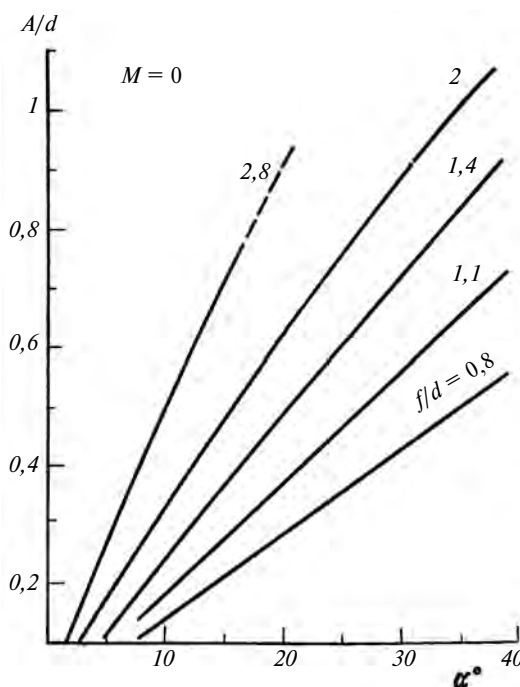


Рис. 279

оценки сканирующих свойств апланатических систем можно считать, что положение точки наилучшей фокусировки совпадает с фокусом лучей, отражающихся от главного зеркала вблизи его вершины, в параксиальной области. На рис. 279 и 280 показана зависимость ординаты фокальной точки ( $A/d$ ) от угла отклонения диаграммы, а на рис. 281—283 — траектория перемещения облучателя при сканировании  $A(m)$ , т. е. фокальная кривая. Все графики построены для антенн с разным отношением  $f/d$  и с разным фокальным отрезком  $M$ . Из графиков видно, что фокальная кривая имеет большую кривизну в антеннах с большим  $f/d$ , а при одном и том же  $f/d$  кривизна фокальной кривой больше у тех антенн, фокус которых лежит между главным и вспомогательным зеркалом.

Особенное внимание следует обратить на кривую, соответствующую  $f/d = 0,9$  на рис. 278, и

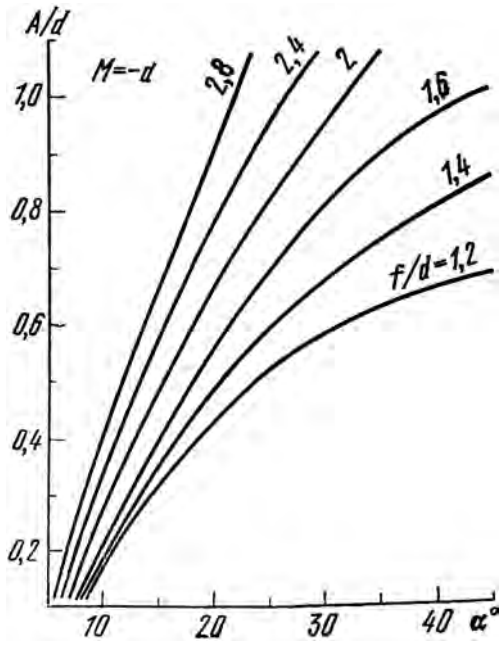


Рис. 280

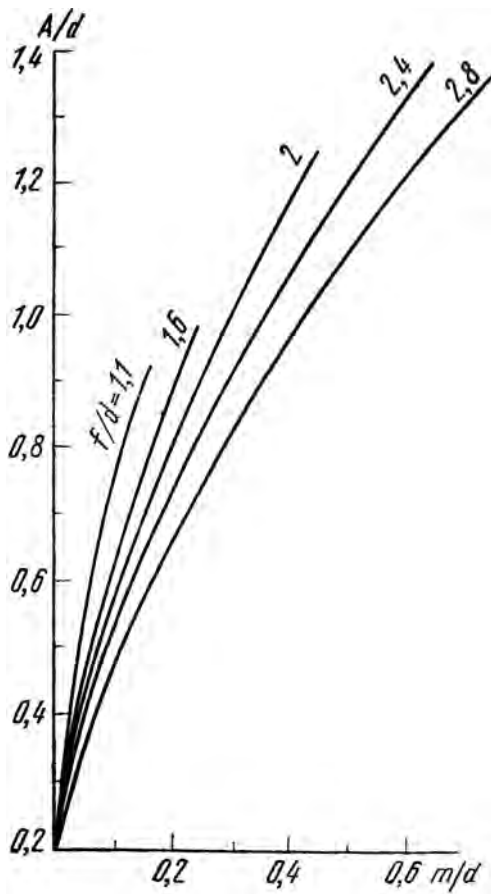


Рис. 281

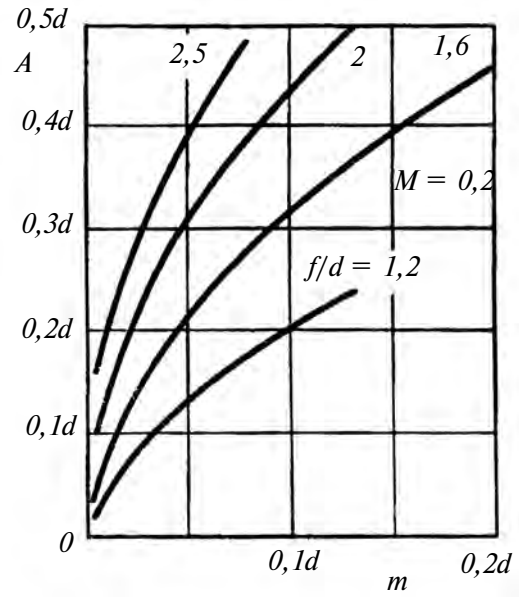


Рис. 282

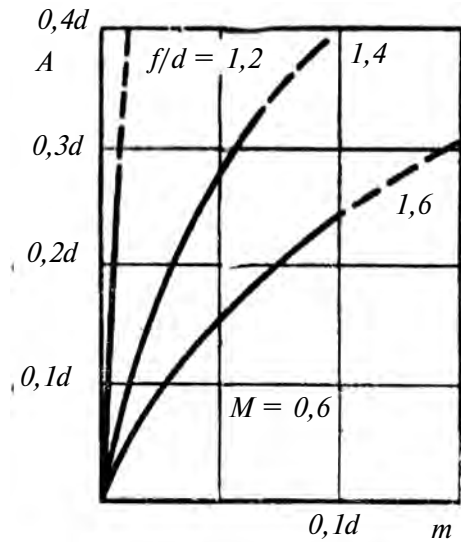


Рис. 283

близкие к ней. Видно, что даже при сканировании на  $30^\circ$  искажения практически отсутствуют, т. к. оба контрольных луча отражаются почти параллельно друг другу. Область отношений  $f/d \sim 1$  соответствует, как будет показано, "идеальным" апланатическим антеннам.

После того, как проведено исследование методом двух лучей, перейдем к анализу уже полных волновых фронтов, чтоб оценить сканирующие возможности апланатических антенн в полном объеме.

## РАСЧЕТ ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ И ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ

Для расчета волнового фронта предположим (рис. 284), что источник из фокуса  $F$  перенесен в некоторую точку  $F_1$ , характеризуемую координатами  $x_1, y_1$  на расстояние  $\rho_1$  от точки  $F$ . Это расстояние равно

$$\rho_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}.$$

Найдем координаты волнового фронта, отраженного от вспомогательного зеркала  $I$ :

$$\left. \begin{aligned} H_{1x} &= (C_1 - |\mathbf{r}_1 - \rho_1|)\xi_{1x} + x_M, \\ H_{1y} &= (C_1 - |\mathbf{r}_1 - \rho_1|)\xi_{1y} + y_M, \\ H_{1z} &= (C_1 - |\mathbf{r}_1 - \rho_1|)\xi_{1z} + z_M, \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

где  $x_M, y_M, z_M$  — координаты вспомогательного (малого) зеркала,  $C_1$  — оптический путь от точки  $F_1$  до некоторого положения отраженного фронта  $\mathbf{H}_1$ ,  $\mathbf{r}_1$  — радиус-вектор вспомогательного

зеркала,  $\xi_{1x}, \xi_{1y}, \xi_{1z}$  — направляющие косинусы единичной нормали к отраженному фронту  $\mathbf{H}_1$ :

$$\left. \begin{aligned} \xi_{1x} &= P_{1x} - 2(\eta_{1x}P_{1x} + \eta_{1y}P_{1y} + \eta_{1z}P_{1z})\eta_{1x}, \\ \xi_{1y} &= P_{1y} - 2(\eta_{1x}P_{1x} + \eta_{1y}P_{1y} + \eta_{1z}P_{1z})\eta_{1y}, \\ \xi_{1z} &= P_{1z} - 2(\eta_{1x}P_{1x} + \eta_{1y}P_{1y} + \eta_{1z}P_{1z})\eta_{1z}. \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Здесь  $P_{1x}, P_{1y}, P_{1z}$  — направляющие косинусы единичной нормали к падающему фронту,  $\eta_{1x}, \eta_{1y}, \eta_{1z}$  — направляющие косинусы единичной нормали к вспомогательному зеркалу:

$$\left. \begin{aligned} P_{1x} &= \frac{r_1 \cos \varphi_1 - x_1}{|\mathbf{r}_1 - \rho_1|}, \\ P_{1y} &= \frac{r_1 \sin \varphi_1 \cos \alpha_1 - y_1}{|\mathbf{r}_1 - \rho_1|}, \\ P_{1z} &= \frac{r_1 \sin \varphi_1 \sin \alpha_1}{|\mathbf{r}_1 - \rho_1|}, \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta_{1x} &= \cos(\varphi_1 - \beta_1), \\ \eta_{1y} &= \cos \alpha_1 \sin(\varphi_1 - \beta_1), \\ \eta_{1z} &= \sin \alpha_1 \sin(\varphi_1 - \beta_1). \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Угол  $\beta_1$  — это угол между нормалью и лучом, падающим на вспомогательное зеркало из фокуса, а угол  $\alpha_1$  определяет сечение на вспомогательном зеркале относительно меридиональной плоскости. Входящую в (40) разность  $|\mathbf{r}_1 - \rho_1|$  можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} |\mathbf{r}_1 - \rho_1| &= \sqrt{(\mathbf{r}_1 \cos \varphi_1 - x_1)^2 + \rightarrow} \\ &\rightarrow + (\mathbf{r}_1 \sin \varphi_1 \cos \alpha_1 - y_1)^2 + (\mathbf{r}_1 \sin \varphi_1 \sin \alpha_1)^2}. \end{aligned} \quad (44)$$

В (43) угол  $\beta_1$  равен

$$\beta_1 = \arctg\left(\frac{1}{r_1} \frac{d\mathbf{r}_1}{d\varphi_1}\right),$$

$$\text{где } \frac{d\mathbf{r}_1}{d\varphi_1} = \frac{\mathbf{r}_1 \left[ f \sin \varphi_1 + (d - \mathbf{r}_1) 2 \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \right]}{2 \left[ d - f \sin^2 \frac{\varphi_1}{2} \right]},$$

$$\mathbf{r}_1 = \frac{d \left( \cos \frac{\varphi_1}{2} \right)^{2d/(f-d)}}{\sin^2 \frac{\varphi_1}{2} \left( \cos \frac{\varphi_1}{2} \right)^{2d/(f-d)} + \left[ 1 - (f/d) \sin^2 \frac{\varphi_1}{2} \right]^{f/(f-d)}}.$$

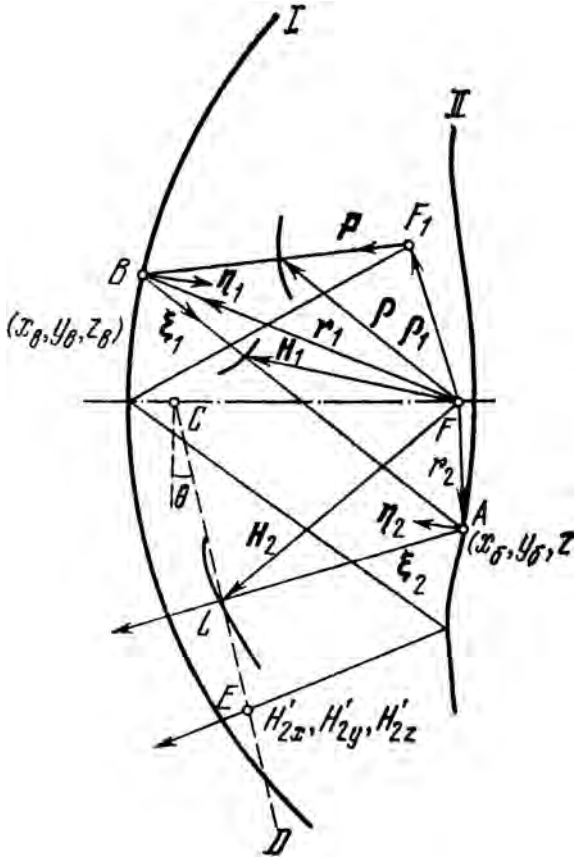


Рис. 284

Найдем теперь координаты фронта, отраженного от главного (большого) зеркала  $II$  в точке  $A$ :

$$\left. \begin{aligned} H_{2x} &= (C_2 - |\mathbf{r}_2 - \mathbf{H}_1|)\xi_{2x} + x_6, \\ H_{2y} &= (C_2 - |\mathbf{r}_2 - \mathbf{H}_1|)\xi_{2y} + y_6, \\ H_{2z} &= (C_2 - |\mathbf{r}_2 - \mathbf{H}_1|)\xi_{2z} + z_6. \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

Здесь  $x_6, y_6, z_6$  — координаты пересечения лучей, принадлежащих фронту  $\mathbf{H}_1$ , с главным зеркалом. Эти координаты должны удовлетворять уравнению большого зеркала апланатической антенны

$$\left. \begin{aligned} x_6 &= \frac{4d(\mathbf{r}_2 - d) + f(f - 2\mathbf{r}_2)\sin^2\varphi_2}{2[2d - \mathbf{r}_2(1 - \cos\varphi_2)]}, \\ y_6 &= f\sin\varphi_2, \quad z_6 = f\sin\varphi_2\sin\alpha_2, \end{aligned} \right\} \quad (46)$$

где

$$\mathbf{r}_2 = \frac{d\left(\cos\frac{\varphi_2}{2}\right)^{2d/(f-d)}}{\sin^2\frac{\varphi_2}{2}\left(\cos\frac{\varphi_2}{2}\right)^{2d/(f-d)} + \left[1 - (f/d)\sin^2\frac{\varphi_2}{2}\right]^{f/(f-d)}},$$

и уравнению луча, идущего по направлению  $\xi_{1x}, \xi_{1y}, \xi_{1z}$  через точку  $x_M, y_M, z_M$ :

$$\frac{x_6 - x_M}{\xi_{1x}} = \frac{y_6 - y_M}{\xi_{1y}} = \frac{z_6 - z_M}{\xi_{1z}}. \quad (47)$$

Для нахождения координат  $x_6, y_6, z_6$  необходимо решить эти уравнения относительно  $\varphi_2$  и  $\alpha_2$ , где  $\varphi_2$  — угол, под которым идет луч из фокуса в точку  $x_6, y_6, z_6$ , а угол  $\alpha_2$  определяет положение этой точки в третьем измерении, так как она в общем случае не лежит в меридиональной плоскости.

Очевидно, найти  $\varphi_2$  и  $\alpha_2$  в функции  $x_M, y_M, z_M, \xi_{1x}, \xi_{1y}, \xi_{1z}$  в явном виде не удастся, так как пришлось бы решать уравнение с дробными степенями. Поэтому  $\varphi_2$  и  $\alpha_2$  можно определить только методом подбора на ЭВМ.

Компоненты в формуле (45) имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \xi_{2x} &= \xi_{1x} = -2(\eta_{2x}\xi_{1x} + \eta_{2y}\xi_{1y} + \eta_{2z}\xi_{1z})\eta_{2x}, \\ \xi_{2y} &= \xi_{1y} = -2(\eta_{2x}\xi_{1x} + \eta_{2y}\xi_{1y} + \eta_{2z}\xi_{1z})\eta_{2y}, \\ \xi_{2z} &= \xi_{1z} = -2(\eta_{2x}\xi_{1x} + \eta_{2y}\xi_{1y} + \eta_{2z}\xi_{1z})\eta_{2z}. \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

Направляющие косинусы нормали к главному зеркалу запишутся в виде

$$\left. \begin{aligned} \eta_{2x} &= -\cos\gamma_2, \quad \eta_y = \cos\alpha_2\sin\gamma_2, \\ \eta_{2z} &= \sin\alpha_2\sin\gamma_2, \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \gamma_2 &= \arctg \frac{y_6 - \mathbf{r}_2\sin\varphi_2}{2d - \mathbf{r}_2(1 - \cos\varphi_2)}, \\ |\mathbf{r}_2 - \mathbf{H}_1| &= \\ &= \sqrt{(H_{1x} - x_6)^2 + (H_{1y} - y_6)^2 + (H_{1z} - z_6)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

Константа  $C_2$  в (45) выбирается из соображений удобства анализа волнового фронта в раскрыве.

Зададим теперь поверхность эталонного плоского фронта, образующего угол  $\theta$  с вертикалью, след которого на рис. 284 обозначен буквами  $CD$ . Для этого необходимо указать точку, через которую пройдет этот фронт, причем эта точка должна быть общей для эталонного фронта и для фронта  $\mathbf{H}_2$ . Пусть эта точка  $E$  располагается на луче, который из облучателя попадает в вершину вспомогательного зеркала ( $\varphi_1 = 0$ ) и находится на расстоянии  $C_1 + C_2$  от облучателя ( $x_1, y_1$ ). Координаты этой точки обозначим  $H'_{2x}, H'_{2y}, H'_{2z}$ . Тогда уравнение плоскости, проходящей через эту точку, имеет вид

$$\cos\theta(x_\Phi - H'_{2x}) - \sin\theta(y_\Phi - H'_{2y}) = 0, \quad (51)$$

где  $x_\Phi, y_\Phi, z_\Phi$  — координаты точки на эталонном фронте.

Теперь необходимо установить координаты пересечения лучей, нормальных к фронту  $\mathbf{H}_2$ , с этим эталонным фронтом. Для этого решим совместно уравнение эталонной плоскости и уравнение луча, идущего через произвольную точку  $H_{2x}, H_{2y}, H_{2z}$  по направлению  $\xi_x, \xi_y, \xi_z$

$$\left. \begin{aligned} \cos\theta(x_\Phi - H'_{2x}) &= \sin\theta(y_\Phi - H'_{2y}), \\ \frac{x_\Phi - H_{2x}}{\xi_{2x}} &= \frac{y_\Phi - H_{2y}}{\xi_{2y}}, \quad \frac{y_\Phi - H_{2y}}{\xi_{2y}} = \frac{z_\Phi - H_{2z}}{\xi_{2z}}. \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

В итоге получаем

$$\left. \begin{aligned} x_\Phi &= \frac{\xi_{2x}[H'_{2x}\cos\theta - (H'_{2y} - H_{2y})\sin\theta] - \xi_{2y}H_{2x}\sin\theta}{\xi_{2x}\cos\theta + \xi_{2y}\sin\theta}, \\ y_\Phi &= \frac{\xi_{2y}}{\xi_{2x}}(x_\Phi - H_{2x}) + H_{2y}, \\ z_\Phi &= \frac{\xi_{2z}}{\xi_{2y}}(y_\Phi - H_{2y}) + H_{2z}. \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

Особенность полученных формул состоит в том, что координаты  $x_\Phi, y_\Phi, z_\Phi$  и  $H_{2x}, H_{2y}, H_{2z}$  лежат на одних и тех же лучах фронта  $\mathbf{H}_2$ , и разность

$$\Delta L = \sqrt{(x_\Phi - H_{2x})^2 + (y_\Phi - H_{2y})^2 + (z_\Phi - H_{2z})^2} \quad (54)$$

представляет собой разность оптических путей между реальным фронтом  $\mathbf{H}_2$  и эталонным плоским фронтом, измеренную вдоль лучей, нормальных к фронту  $\mathbf{H}_2$ .

Обычно представляет интерес не столько сам фронт волны (45), сколько его отклонение от эталонного (54), причем заранее неизвестно оптимальное положение облучателя, соответствующее данному наклону эталонной плоскости, т. е.

заданному отклонению диаграммы направленности. Подбор оптимального положения облучателя (координаты  $x_1, y_1$ ) производится, исходя из допустимой максимальной, средней или среднеквадратичной ошибки в раскрыве при фиксированном наклоне эталонной плоскости.

Рассмотрим порядок расчета ДН первоначально апертурным, а затем токовым методом.

Для расчета методом Гюйгенса—Кирхгофа найдем распределение поля в раскрыве. Его можно найти на основании уравнения баланса энергий для осесимметричных антенн:

$$P(\varphi)\sin\varphi d\varphi = P(y)dy,$$

где  $P(\varphi)$  — диаграмма направленности облучателя по мощности,  $P(y)$  — распределение мощности в раскрыве. Тогда

$$P(y) = \frac{P(\varphi)\sin\varphi}{y \frac{dy}{d\varphi}}.$$

Поскольку у апланатических антенн  $y = f\sin\varphi$ , то

$$P(y) = \frac{P(\varphi)}{f\cos\varphi}.$$

На рис. 285 приведены некоторые варианты распределения поля при условии, что диаграмма направленности облучателя аппроксимируется функцией  $\cos^n\varphi$ . На рисунке сплошные кривые — это  $P(y)$ , а штриховые — соответствующие им  $P(\varphi)$ . Видно, что апланатическая антенна имеет тенденцию выравнивать распределение поля: спад напряженности поля в диаграмме направленности к краям апертурного угла компенсируется увеличением плотности лучей на краях раскрыва по сравнению с центром.

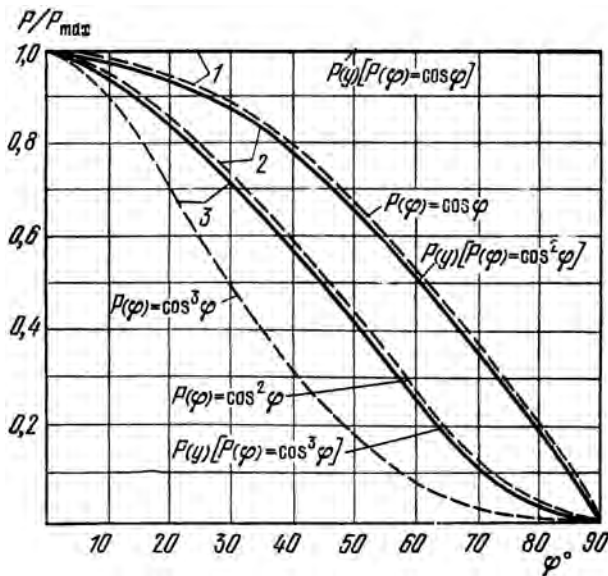


Рис. 285

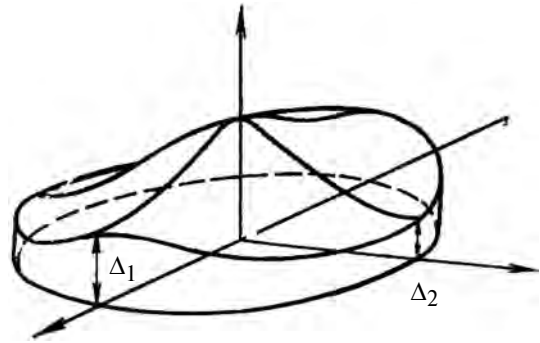


Рис. 286

Если диаграмма направленности в дальней зоне определяется интегралом

$$f(\theta) = \int_0^{\pi D/2} \int_0^{\pi D/2} \sqrt{P(\varphi)/\cos\varphi} \exp(-ik\rho\sin\theta\cos\varphi) \rho d\rho d\varphi,$$

то для простейших аппроксимаций распределения поля по раскрыву этот интеграл может быть взят сравнительно легко. Так, если распределение поля имеет вид, как на рис. 286, где  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  — скачки поля во взаимно перпендикулярных плоскостях, то это распределение можно аппроксимировать следующей функцией:

$$f(\rho, \vartheta) = \left[ \Delta_2 + (1 - \Delta_2)\cos^2\frac{\pi\rho}{2} \right] \sin^2\varphi + \left[ \Delta_1 + (1 - \Delta_1)\cos^2\frac{\pi\rho}{2} \right] \cos^2\vartheta,$$

где  $\rho$  и  $\vartheta$  — полярные координаты в плоскости раскрыва.

Тогда в плоскости  $\varphi = 0$  диаграмма направленности будет иметь вид

$$F(u, 0) = \Delta_1 \frac{J_1(u)}{u} - \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{2} \left[ 2 \frac{J_0(u) - 1}{u^2} + \chi_2(u) \right] + (1 - \Delta_2 - \Delta_1)\chi_0(u),$$

а в плоскости  $\vartheta = \pi/2$

$$F(u, \pi/2) = \Delta_2 \frac{J_1(u)}{u} + \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{2} \times \left[ 2 \frac{J_0(u) - 1}{u^2} + \chi_2(u) \right] + \left( 1 - \frac{\Delta_2 + \Delta_1}{2} \right) \chi_0(u),$$

где

$$\chi_0(u) = \int_1^0 \rho J_0(u\rho) \cos^2(\pi\rho/2) d\rho,$$

$$\chi_2(u) = \int_1^0 \rho J_2(u\rho) \cos^2(\pi\rho/2) d\rho, \quad u = \frac{\pi}{\lambda} D \sin\theta,$$

а  $\rho = 2r/D$  — текущий радиус.

# РАСЧЕТ ДН АПЛАНАТА ТОКОВЫМ МЕТОДОМ

Рассмотрим рис. 287, где 1 — вспомогательное, 2 — главное зеркала, облучатель помещен в произвольную точку с координатами  $x_1, y_1$  в общем случае не совпадающими с координатами фокуса антенны. Начало координат находится в фокусе антенны.

Плотность поверхностного тока на вспомогательном зеркале определяется соотношением (с точностью до постоянного множителя)

$$\vec{j}_1 = [\vec{n}_1 [\vec{\rho} \vec{E}_1]],$$

где  $\vec{n}_1$  — единичная нормаль к вспомогательному зеркалу,  $\vec{\rho}$  — единичный вектор, направленный от облучателя в точку на вспомогательном зеркале,  $\vec{E}_1$  — вектор напряженности электрического поля облучателя у поверхности вспомогательного зеркала.

$$\vec{E}_1 = (\rho, \varphi) = AF(\theta, \varphi) \vec{e}(\theta, \varphi) \frac{e^{-jk\rho}}{\rho},$$

где  $A$  — амплитудный коэффициент,  $F(\theta, \varphi)$  — диаграмма направленности,  $\vec{e}(\theta, \varphi)$  — единичный вектор, определяющий поляризацию поля облучателя. Для линейно поляризованного поля можно записать:

$$F(\theta, \varphi) \vec{e}(\theta, \varphi) = F_E(\theta) \sin\varphi \vec{a}_\theta + F_H(\theta) \cos\varphi \vec{a}_\varphi,$$

где  $F_E(\theta)$  и  $F_H(\theta)$  — диаграммы направленности в плоскости  $E$  и  $H$ ,  $\vec{a}_\theta$  и  $\vec{a}_\varphi$  — соответствующие единичные векторы в системе координат  $\rho, \theta, \varphi$  (см. рис. 288). Направляющие косинусы вектора  $\vec{\rho}$  имеет вид:

$$\rho_x = (x_B - x_1)/|\vec{\rho}|; \rho_y = (y_B - y_1)/|\vec{\rho}|; \rho_z = z_B/|\vec{\rho}|.$$

Здесь  $x_B = r \cos\theta$ ;  $y_B = r \sin\theta \sin\varphi$ ,  $z_B = r \sin\theta \cos\varphi$ ,

$$r = \frac{d^2 \left[ d - f \sin^2 \frac{2\theta}{2} \right]^{d/(d-f)}}{d \sin^2 \frac{2\theta}{2} \left[ d - f \sin^2 \frac{2\theta}{2} \right]^{d/(d-f)} + \left( \cos^2 \frac{2\theta}{2} \right)^{d/(d-f)}}$$

в случае двухзеркальной апланатической антенны. В общем случае осесимметричной двухзеркальной антенны радиус-вектор  $r$  определяется дифференциальным уравнением

$$\frac{1}{r} \frac{dr}{d\theta} = \frac{d - r + f \cos^2 \frac{2\theta}{2}}{d - f + f \cos^2 \frac{2\theta}{2}},$$

$$y = f(\theta) \sin\theta.$$

Отраженное от вспомогательного зеркала электрическое поле может быть записано в виде

$$E_{\text{отр}}(\theta, \varphi) = iB \frac{e^{-ikr}}{R} \int_s \frac{F(\theta, \varphi)}{\rho} [\vec{n} [\vec{d}_\rho \vec{e}]] \exp[-ik(\rho - (\vec{\rho} \vec{R}_1))] dS.$$

Здесь двойное векторное произведение  $[\vec{n} [\vec{d}_\rho \vec{e}]]$  определяет касательную к поверхности зеркала составляющую электрического поля облучателя. Действительно, произведение

$$\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} AF(\theta, \varphi) [\vec{a}_\rho \vec{e}] = \vec{H}_1$$

составляющая вектора напряженности магнитного поля облучателя, перпендикулярная вектору  $\vec{d}_\rho$ . Произведение  $AF(\theta) [\vec{n} \times \vec{H}_1]$  дает касательную к поверхности зеркала, составляющую электрического поля.

Скалярное произведение  $(\vec{\rho}, \vec{R}_1)$  определяет фазу поля отраженной волны по отношению к началу координат (рис. 289), если точка наблюдения находится в дальней зоне ( $R_1$  — единич-

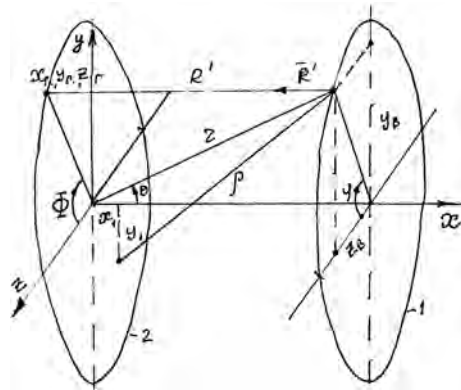


Рис. 287

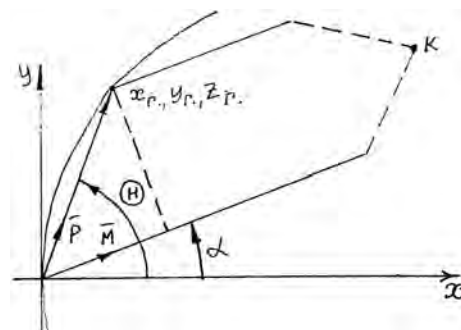


Рис. 288

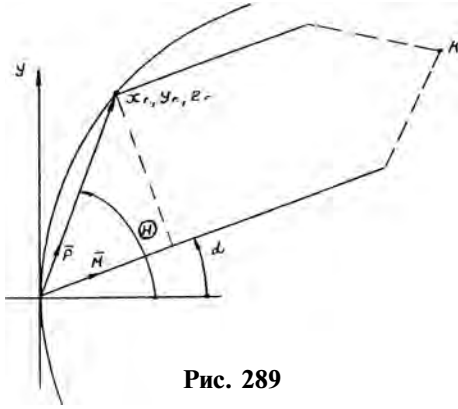


Рис. 289

ный вектор, направленный в точку наблюдения  $\bar{\rho} = \bar{\rho} \bar{d}_\rho$ ). Здесь

$$n = -\sin\varphi \bar{d}_\rho + \cos\varphi \bar{d}_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{dP}{d\theta}\right)^2 + \rho^2}}$$

Элемент поверхности

$$dS = \rho \sin\theta \sqrt{\left(\frac{dP}{d\theta}\right)^2 + \rho^2} d\theta d\Phi.$$

Магнитное поле у поверхности главного зеркала, создаваемое токами, текущими по вспомогательному зеркалу (с точностью до постоянных множителей),

$$\bar{H}_1 = \int_{\theta=0}^{\theta=\theta_k} \int_{\varphi=0}^{2\pi} [|\bar{J}_i - (|\bar{J}_i \bar{R})/\bar{R}|] \frac{e^{-ik(\rho+R)}}{\rho R} \rho^2 \sin\theta d\theta d\varphi.$$

Здесь  $\rho = \sqrt{(x_B - x_1)^2 + (y_B - y_1)^2 + z_B^2}$  — расстояние от облучателя до точки на вспомогательном зеркале,  $\theta_1$  — угол, образованный с осью лучом, проведенным из фокуса в крайнюю точку вспомогательного зеркала — половина апертурного угла;  $R'$  — расстояние от точки на вспомогательном зеркале до точки на главном зеркале

$$R' = \sqrt{(x_B - x_\Gamma)^2 + (y_B - y_\Gamma)^2 + (z_B - z_\Gamma)^2}.$$

$R'$  — единичный вектор, направленный вдоль  $R'$  от вспомогательного зеркала к главному. Направляющие косинусы этого единичного вектора

$$R'_x = \frac{x_\Gamma - x_B}{R'}; R'_y = \frac{y_B - y_\Gamma}{R'}; R'_z = \frac{z_B - z_\Gamma}{R'}.$$

Практически вычисление интеграла  $\bar{H}_1$  производится следующим образом: фиксируется некоторая точка с координатами  $x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma$  на главном зеркале и для этой точки вычисляется интеграл  $\bar{H}_1$  в заданном диапазоне углов  $\theta$  и  $\varphi$  от всего вспомогательного зеркала. Затем берется новая точка  $x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma$  и вычисление интеграла повторяется. Таким образом, в каждой точке  $x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma$  вычисляется поле, создаваемое всей поверхностью вспомогательного зеркала. Затем в каждой

точке главного зеркала может быть найдена плотность поверхности тока

$$\bar{J}_2 = 2[\bar{n}_\Gamma \bar{H}_1],$$

где  $\bar{n}_\Gamma$  — единичная нормаль к поверхности главного зеркала.

Если представить поле, отраженное от вспомогательного зеркала, в виде произведения  $\bar{E}_{\text{отр}}(\theta, \Phi) = F'(\Theta, \Phi) \bar{e}'(\Theta, \Phi)$ , то поле, отраженное от главного зеркала, имеет вид:

$$E'_{\text{отр}} = (\theta', \bar{\Phi}') = = iB' \frac{e^{-ikR'}}{R'} \int_{S_{\text{гл}}} \frac{F'(\Theta, \Phi)}{R} [\bar{n}[\bar{R}, \bar{e}]] e^{-ik[R - (\bar{R}_1, \bar{R}'_1)]} dS,$$

где  $\bar{R}_1$  — вектор длиной  $R$ , направленный вдоль луча от вспомогательного зеркала до главного,  $\bar{R}'_1$  — вектор до точки наблюдения в дальней зоне.

Переходя к найденным значениям плотности тока, можно записать, опуская постоянные множители, вектор напряженности электрического поля в дальней зоне определяется интегралом по внутренней поверхности главного зеркала

$$\bar{E} = \int_{\Theta=\Theta_k}^{\pi/2} \int_{\Phi=0}^{\pi} [|\bar{J}_2 - (|\bar{J}_2 \bar{\mu})/\bar{\mu}|] e^{ikp(\bar{\rho} \bar{M})} p^2 \sin\Theta d\Theta d\Phi.$$

Здесь, в соответствии с рис. 290,  $\bar{\mu}$  — единичный вектор, направленный под углом  $\Theta$  к оси антенны в точку наблюдения в дальней зоне,  $\bar{\rho}$  — единичный вектор, направленный из начала координат в произвольную точку с координатами  $x_\Gamma, y_\Gamma, z_\Gamma$  на главном зеркале,  $p$  — расстояние от начала координат до этой точки

$$p = \sqrt{x_\Gamma^2 + y_\Gamma^2 + z_\Gamma^2}.$$

Направляющие косинусы вектора  $M$

$$M_x = \cos\Theta_M, M_y = \sin\Theta_M, M_z = 0.$$

Угол  $\Theta_k$  соответствует направлению на край раскрыва главного зеркала

$$\Theta_k = \arctg \frac{y_{\Gamma \max}}{x_{\Gamma \max}},$$

$$y_{\Gamma \max} = f \sin\theta_k,$$

$$x_{\Gamma \max} = \frac{4d(r-d) + f(f-2r)\sin^2\theta_k}{2[2d - r(1 - \cos\theta_k)]}, (\Theta_k \neq \theta_k)$$

где  $r$  вычисляется при  $\theta = \theta_k$  по формулам, приведенным выше.

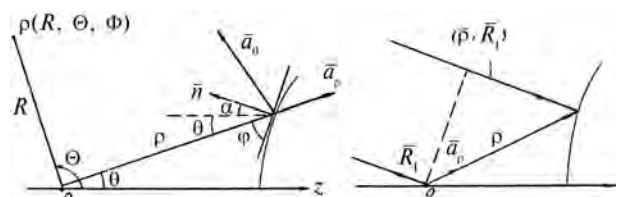


Рис. 290



## ВОЗМОЖНОСТИ АПЛАНАТОВ КАК СКАНИРУЮЩИХ АНТЕНН

Для первого ознакомления с результатами расчетов волновых фронтов и структуры лучей при сканировании рассмотрим два варианта апланатов, имеющих  $f/d = 1,05$  и  $f/d = 1,6$  ( $f$  — фокусное расстояние,  $d$  — осевой размер) при сканировании на  $10^\circ$ . На рис. 291 показана структура лучей в режиме передачи при  $f/d = 1,6$ . На рис. 291, а структура лучей в области фокуса в режиме приема. На рис. 292 показана структура

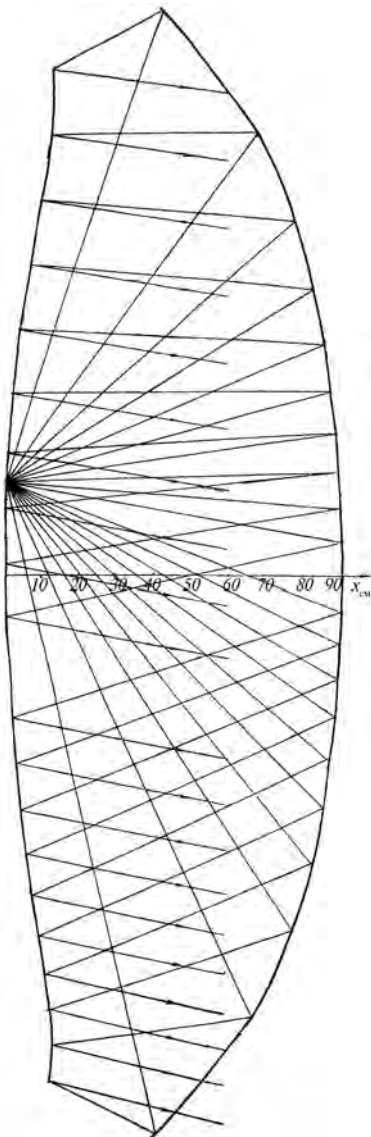


Рис. 291

лучей в режиме передачи при  $f/d = 1,05$ . Структура лучей на рис. 291 и 291, а показана в меридиональной плоскости, но для полной картины и для оценки возможного астигматизма желательно посмотреть, что происходит в перпендикулярной (сагиттальной) плоскости. Для этого рассмотрим рис. 295, на которых показана структура лучей в этой плоскости: видно, что заметного астигматизма не наблюдается. На рис. 296 показаны проекции линий одинаковой фазы на фронтальную плоскость, параллельную плоскости раскрытия. Если опять же вспомнить аналогичные картинки для параболического зеркала (рис. 32, 33), то станет ясно, что существенного астигматизма действительно нет при таком угле сканирования.

Следует иметь в виду, что при  $f/d > 3$  вспомогательное зеркало так изменяет свою форму, что осевой размер антенны определяется уже не размером  $d$ , а проекцией на ось периферийных участков вспомогательного зеркала, имеющего вогнутую форму (выпуклостью в сторону главного зеркала) вблизи оси и выпуклую — на удаленных от оси участках зеркала. На рис. 293 показано сечение антенны с  $f/d = 3,15$  при сканировании на  $8,5^\circ$ . Большой угол сканирования при такой схеме антенны приводит к потере отражающей поверхности главного зеркала, т. к. лучи, отраженные от него в режиме приема в верхней его части, не будут вообще попадать на вспомогательное зеркало.

Наконец, проследивая размеры пятна, образованного линиями одинаковой фазы, можно

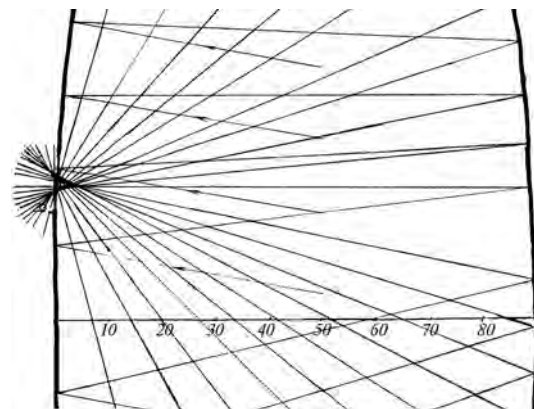


Рис. 291, а

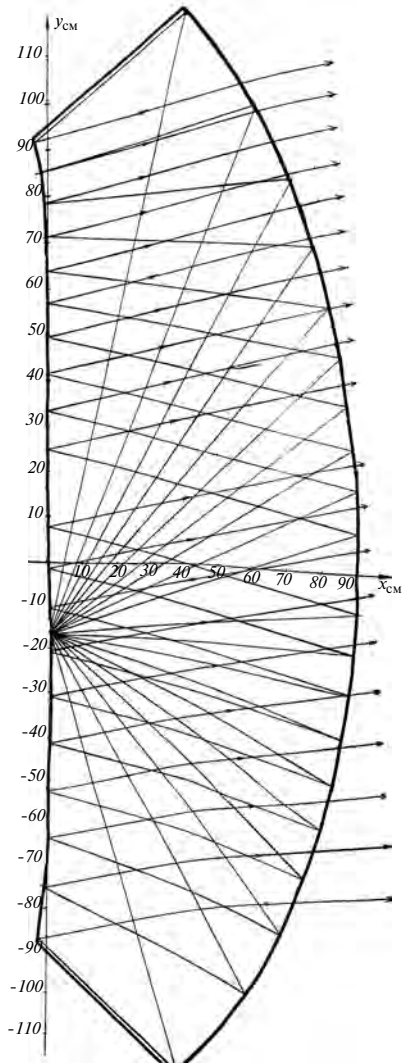


Рис. 292

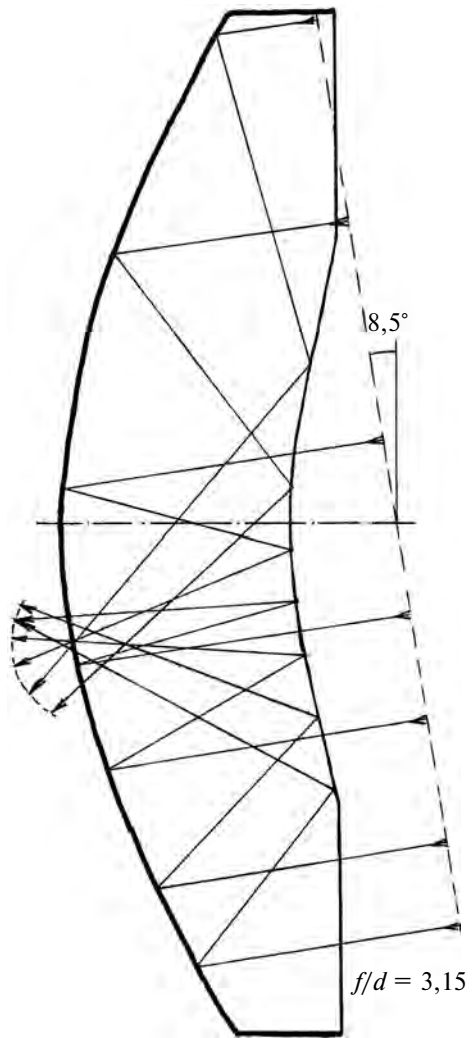


Рис. 293

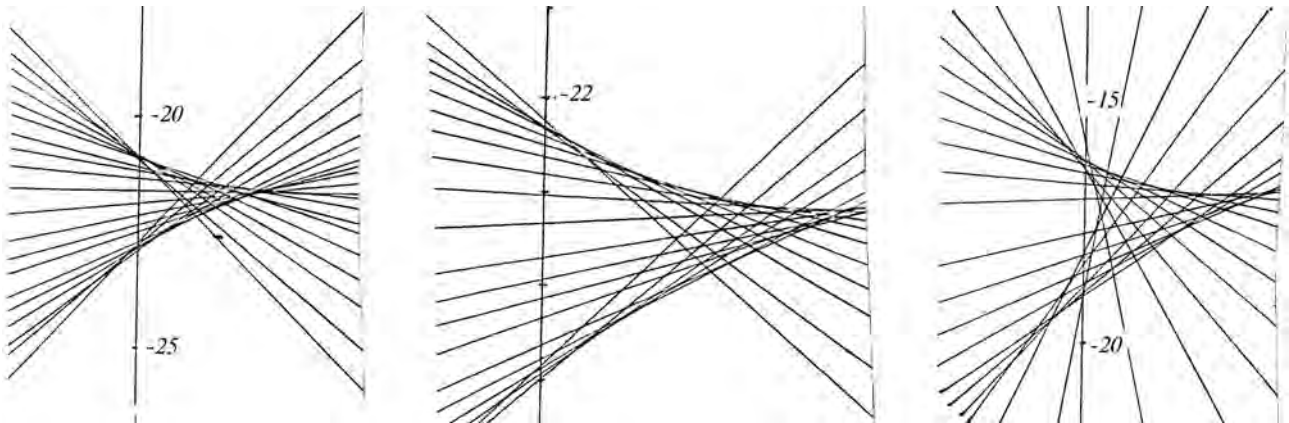


Рис. 294

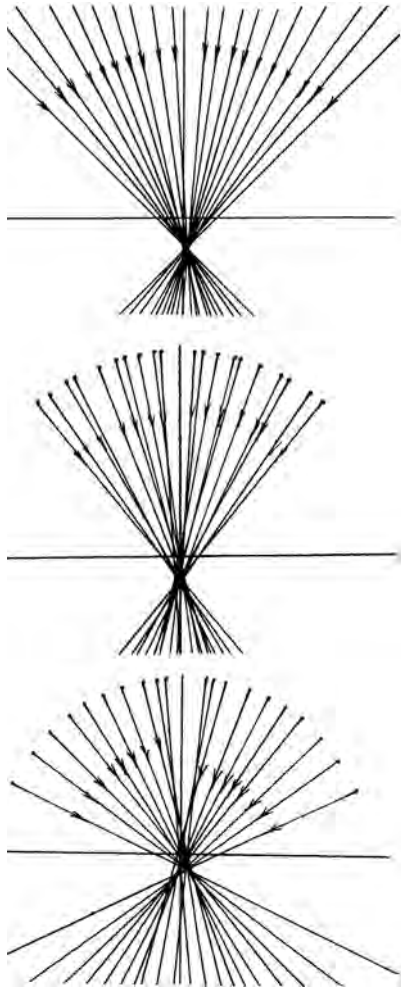


Рис. 295

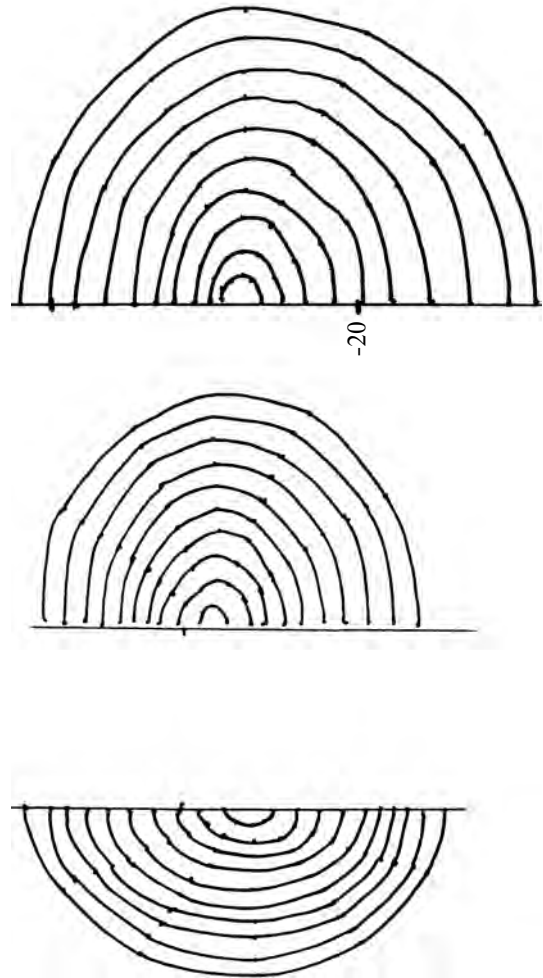


Рис. 296

судить о размерах фокального пятна при сканировании. Например, при диаметре раскрытия антенны порядка 300 длин волн диаметр фокального пятна, содержащего все лучи в области фокуса, не превышает одной длины волны. На рис. 297—299 представлены сечения волновых фронтов в раскрытии антенны с фокальными отрезками  $M = -d$  и для различных углов отклонения диаграммы направленности. По вертикали отложена разность хода лучей  $\Delta L$ , а по горизонтали — текущий радиус раскрытия в долях осевого размера. Приведенные графики, конечно, далеко не исчерпывают всех возможных вариантов сканирующих антенн, но дают общее представление об их возможностях, например, антенна, у которой  $M = -d$ , может обеспечивать сканирование даже в секторе  $\pm 60^\circ$ , причем искажения волнового фронта на краю раскрытия не будут превышать  $0,04d$  при диаметре около  $3d$ . Для реализации такой антенны можно использовать схему волноводного коллиматора, рассмотренного в начальных разделах.

Далее на рисунках 300, 301 представлены главные параметры двухзеркальных апланатов как сканирующих антенн.

На рис. 300 дан обобщенный график зависимости диаметра апланатической антенны от величины фокального отрезка  $M$  для различных углов сканирования  $-\pm 10^\circ, \pm 20^\circ, \pm 40^\circ$ . Видно, что антенны с  $M < 0$  могут обеспечить большое отношение  $D/d$  при одном и том же значении максимальной ошибки на краю раскрытия, равной  $0,02d$ .

Как можно использовать полученный обобщенный график для оценки искажений? Покажем это на простом примере. Пусть длина волны  $\lambda = 3,2$  см; если считать, что допустимая величина искажений фронта на краю сектора сканирования составляет  $\lambda/4$ , т. е.  $0,8$  см, то осевой размер антенны  $d = 8 \text{ мм}/0,02 = 400$  мм, и по обобщенному графику определяем наибольший диаметр антенны с таким осевым размером. Например, при сканировании на  $\pm 10^\circ$  этот диаметр может составить  $5 \times 400 = 2000$  мм, при сканировании на  $\pm 40^\circ$  — около 800 мм.

Если получающийся при таком расчете диаметр является недостаточным по каким-то соображениям (например, по ширине диаграммы направленности), то он может быть увеличен при одновременном увеличении осевого размера. Однако следует особенно подчеркнуть сле-

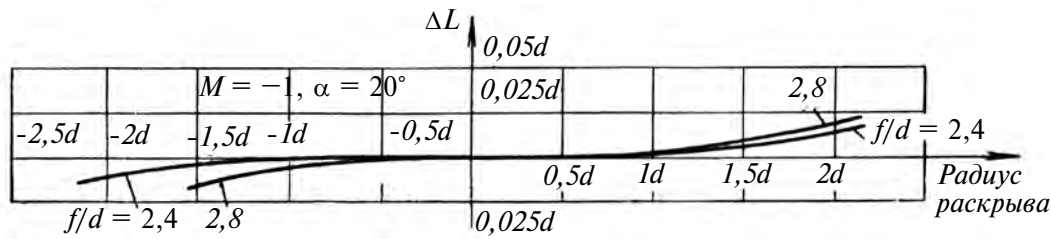


Рис. 297

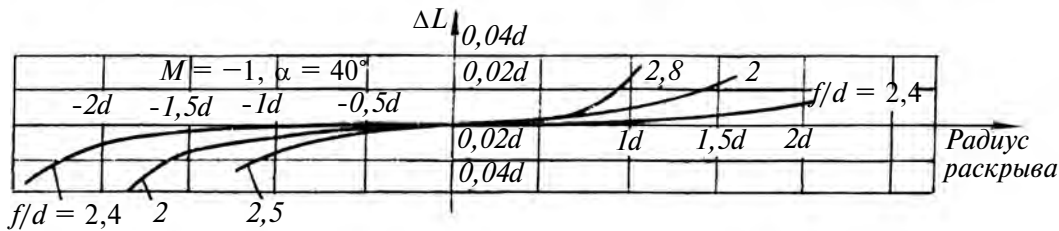


Рис. 298

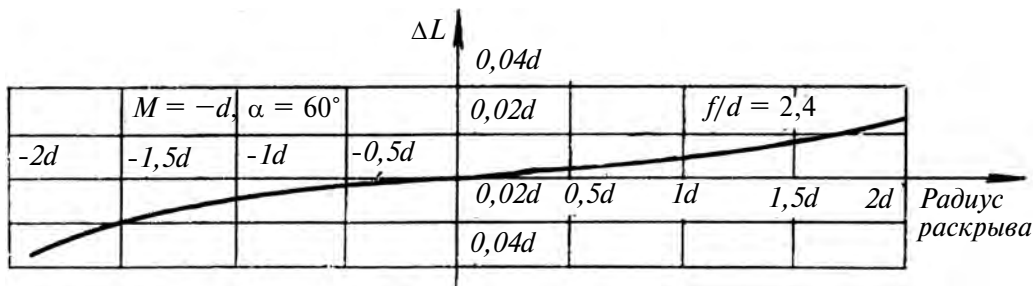


Рис. 299

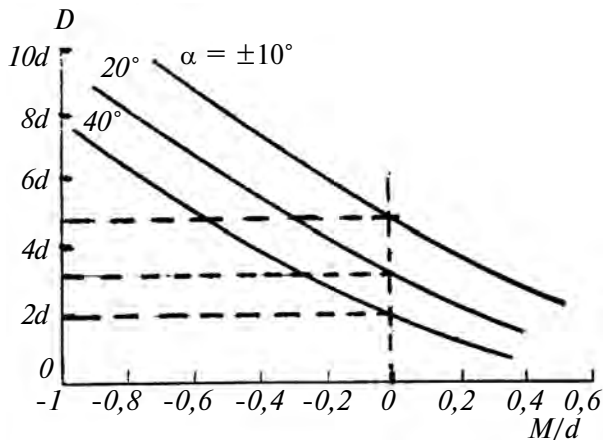


Рис. 300

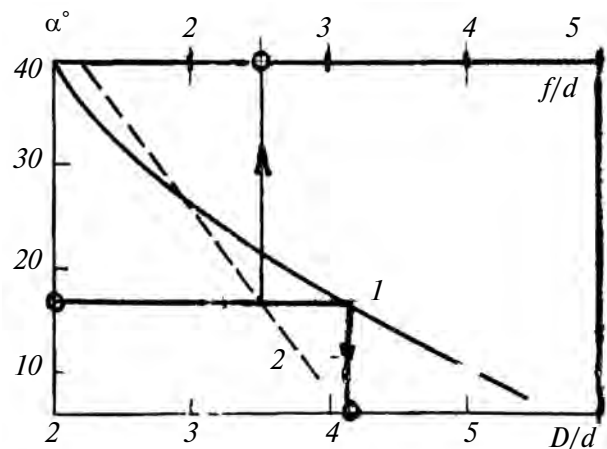


Рис. 301

дующий момент: при увеличении диаметра по сравнению с полученным на основании графиков рис. 300 необходимо для сохранения такой же допустимой ошибки (8 мм) уменьшить отношение  $D/d$ , т. е. увеличить осевой размер не пропорционально увеличению  $D$ , а в значительной большей степени.

Рассмотрим также рис. 301, на котором построена зависимость максимального угла  $\alpha$  отклонения диаграммы направленности шириной  $1,5^\circ$  от отношения  $D/d$ , т. е. от относительного

диаметра антенны (кривая 1). Особенностью этого обобщенного графика является то, что по горизонтальной оси отложено максимально возможное отношение  $D/d$  для апланатических антенн, т. е. для каждого угла отклонения диаграммы найдена наиболее "тонкая" антенна, имеющая вместе с тем ширину луча  $1,5^\circ$  в осевом направлении. Кривая 2 на том же рисунке дает возможность определить, какое необходимо фокусное расстояние (точнее  $f/d$ ) для реализации такой антенны.

## АНТЕННА ЗРК "КРУГ" — САМЫЙ ТОНКИЙ АПЛАНАТ

Как уже отмечалось в разделе о применении зеркальных антенн в радиолокационных системах, в задании на разработку антенны целевого канала для ЗРК "Круг" (рис. 171—174, а) одно из основных требований к конструкции антенны было требование минимального осевого размера, поскольку в походном положении антенна вместе с опорно-поворотным устройством должна была укладываться на крышу башни самоходной установки для беспрепятственного прохождения под мостами и путепроводами. Этому требованию более всего удовлетворяет антенна с  $f/d = 2,8$ , сечение волнового фронта которой при отклонении ДН на  $10^\circ$  представлено на рис. 302. Профили зеркал показаны на рис. 302, а. Графики построены в предположении, что максимальные искажения фронта не превышают  $0,02d$ . Видно, что соответствующая антенна имеет диаметр в пять раз превосходящий ее осевой размер. Зеркала показаны на рис. 174, а. Для реализации такой антенны использовался принцип поворота плоскости поляризации для устранения полного затенения главного зеркала вспомогательным. В конструкции антенны впервые в практике производства серийных радиолокационных антенн были решены проблемы создания стеклопластиковых радиопрозрачных конструкций при необходимом запасе прочности, долговечности и стабильности электрических параметров в боевых условиях — ЗРК "Круг" и его модификации долгие годы находились на вооружении Советской армии и целого ряда зарубежных армий. Техника двухзеркальных антенн с поворотом плоскости поляризации нашла применение в ЗРК "Оса" и ряда других.

Для обеспечения сканирования ДН в вертикальной плоскости используется так называемый сканер

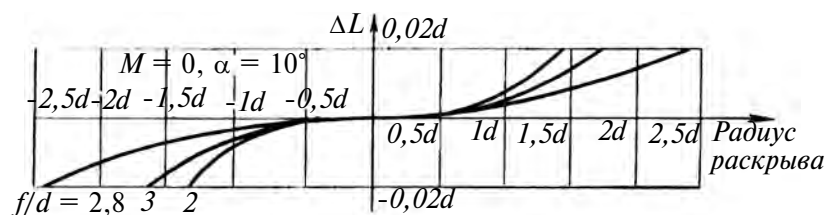


Рис. 302

органного типа, показанный на рис. 303. Вращающийся рупор 1, сочлененный с переходом вращения 2, поочередно запитывает входы волноводов равной электрической длины, противоположные открытые концы которых располагаются на линии  $AB$ , совпадающей с фокальной кривой антенны. Количество одновременно запитываемых волноводов и их ширина определяются необходимым апертурным углом антенны. Обычно волноводы, похожие на органные трубы, примыкают друг к другу в плоскости  $E$ .

Что касается общей конструкции антенны, то, как видно из схемы рис. 291—293, желательно, чтобы она представляла собой замкнутый объем барабанного типа, тем самым вспомогательное зеркало играет роль защитного обтекателя, что позволяет эффективно защищать систему облучателей от механических и климатических повреждений, что чрезвычайно важно для таких систем, как зенитно-ракетные комплексы, которые должны работать в любых условиях погоды зимой и летом, под дождем и снегом, градом, при обледенении и во время песчаных бурь. И если нахождение облучателей далеко перед раскрытием однозеркальной антенны делает его беззащитным перед любым булыжником, осколком или веткой в лесу, то на двухзеркальной антенне с поворотом плоскости поляризации с вспомогательным зеркалом из стеклопластика можно хоть танцевать, хоть спать укладываться.

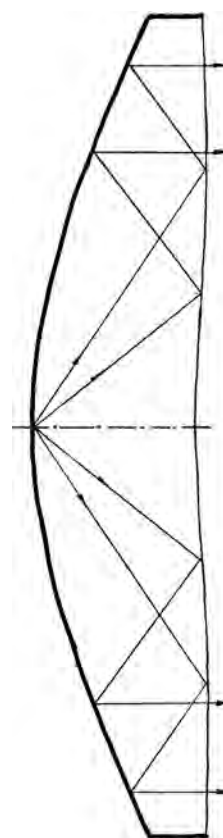


Рис. 302, а  
Профиль антенны  
ЗРК "Круг"

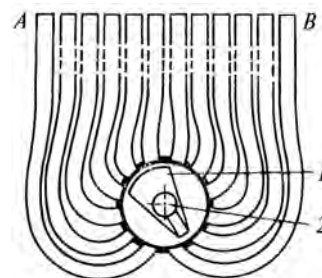


Рис. 303

## АПЛАНАТ С 90-ГРАДУСНЫМ СЕКТОРОМ СКАНИРОВАНИЯ

Как можно видеть из графиков рис. 278 и рис. 300, апланатическая антенна может обеспечить сканирование ДН в весьма широком секторе углов при неподвижном раскрыве антенны. Однако при углах сканирования, близких к  $\pm 45^\circ$ , даже при отсутствии искажений происходит потеря значительной части полезной площади раскрыва, пропорциональной косинусу угла сканирования. Рассмотрим возможность создания апланатической антенны для санирования в секторе  $\pm 45^\circ$ .

Для этой цели подходит антенна, имеющая нормированное фокусное расстояние.  $f/d \cong 1,1$ . На рис. 304 показан ход лучей в такой антенне при расположении источника в фокусе на оси (точка  $A$ ); видно, что диаметр вспомогательного зеркала  $I$  почти равен диаметру главного зеркала  $II$ , а апертурный угол вспомогательного зеркала равен  $100^\circ$ . При сканировании на максимальный угол  $\sim 45^\circ$  для облучения всего раскрыва главного зеркала (рис. 305) необходимо использовать дополнительные участки вспомогательного зеркала, рассчитываемые в соответствии

с формулами для апланатической антенны. Добавочные участки вспомогательного зеркала обозначены штрихпунктирной линией; формально им соответствуют штриховые участки главного зеркала, которые в реальной антенне не используются. Полный размер вспомогательного зеркала, таким образом, соответствует  $BC$ , а главного зеркала —  $D$ .

Ранее уже были рассмотрены свойства этой антенны при сканировании на  $10^\circ$  (рис. 292, 292,  $a$ ) и найдено, что данная антенна наиболее близка по своим свойствам к анастигмату, поскольку ее астигматизм имеет наименьшую величину среди всех зеркальных антенн. Из всех антенн, удовлетворяющих условию синусов, антенна с  $f/d = 1-1,1$  является наилучшим воплощением термина "апланат", поскольку этот термин, как отмечено во вступительном разделе, означает "не имеющий искажений".

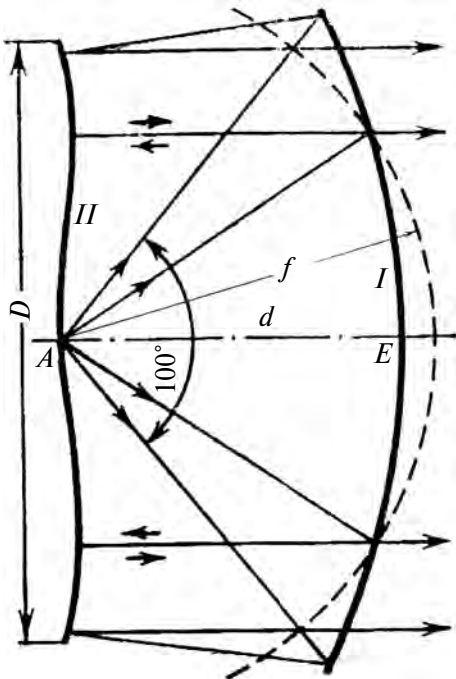


Рис. 304

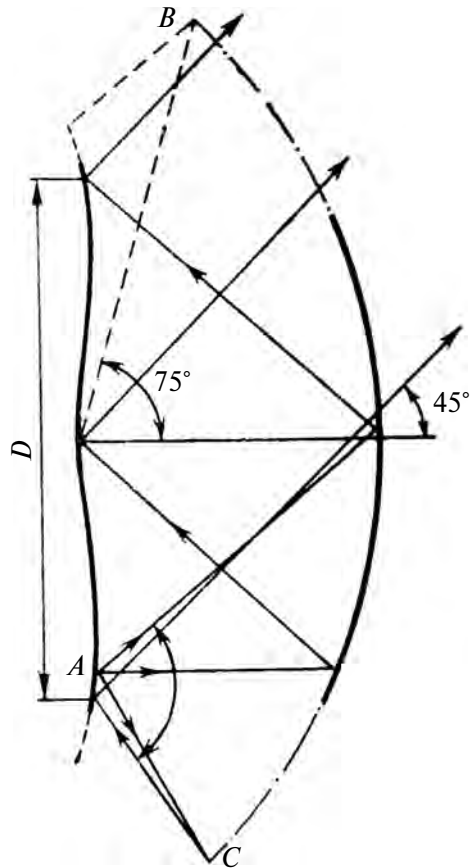


Рис. 305

## АПЛАНАТ ДЛЯ ДОППЛЕРОВСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СКОРОСТИ И УГЛА СНОСА (ДИСС)

Антенные устройства ДИСС, как правило, формируют три или четыре разнесенных в пространстве луча.

Ориентация каждого луча в пространстве характеризуется некоторым средним направлением, которое проходит через центр тяжести квадрата его диаграммы направленности. Среднее направление может быть определено любой парой углов, обозначенных на рис. 306. Например,  $B$  и  $\Gamma$ ,  $\gamma$  и  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $\nu$  и др. Связь между этими углами устанавливается посредством следующих тригонометрических соотношений:

$$\cos \gamma = \cos B \cos \Gamma, \quad \cos \nu = -\cos B \sin \Gamma,$$

$$\sin B = \cos \alpha \sin \gamma, \quad \operatorname{tg} \Gamma = \sin \alpha \operatorname{tg} \gamma.$$

От точности определения углов непосредственно зависит точность работы станции. При этом необходимо, чтобы ориентация лучей была стабильна в процессе эксплуатации на борту летательного аппарата. Наиболее жесткие требования предъявляются к антеннам прецизионных ДИСС, для которых углы должны быть известны с точностью примерно 1—3'. Номиналы углов для ДИСС лежат примерно в следующих преде-

лах:  $B_0 = 60\text{--}75^\circ$ ,  $\Gamma_0 = 15\text{--}45^\circ$ ,  $\gamma_0 = 65\text{--}80^\circ$ ,  $\nu_0 = 65\text{--}80^\circ$ .

В доплеровских измерителях находят применение антенные устройства, формирующие диаграммы направленности карандашной формы и так называемые изочастотные диаграммы. Карандашные диаграммы присущи антеннам оптического типа — зеркальным и линзовым, изочастотные диаграммы — волноводно-щелевым антеннам. Ширина диаграммы направленности зависит от действующего раскрыва антенны и длины рабочей волны. В свою очередь, раскрыв антенны ограничивается допустимой площадью выреза в фюзеляже летательного аппарата. Обычно площадь выреза составляет 0,2—0,4 м<sup>2</sup>.

Для того чтобы наилучшим образом использовать эту площадь, целесообразно применять многолучевые антенны, которые формируют все лучи с одного раскрыва. Естественно, не исключается возможность использования отдельных антенн для формирования каждого луча.

В зависимости от режима работы ДИСС антенное устройство может состоять либо из двух отдельных антенн — приемной и передающей, либо может представлять собой одну совмещенную антенну. Две отдельные антенны применяются в ДИСС с непрерывным режимом излучения, когда требуется обеспечить надежную развязку (80—90 дБ) между приемным и передающим каналом. Совмещенные антенны применяются в импульсных и непрерывно-импульсных ДИСС, а также в некоторых ДИСС с ЧМ, когда достаточна развязка примерно 40—50 дБ.

При использовании двух отдельных изочастотных антенн ширина лучей в сантиметровом диапазоне волн обычно лежит в пределах 3—5° в плоскости углов  $\gamma$  и 5—10° в плоскости углов  $\nu$ . Для антенн с карандашными лучами ширина лежит в пределах 3—6 градусов.

Одним из основных требований, предъявляемых к антенному устройству ДИСС, является обеспечение низкого уровня боковых и дальних лепестков. Это требуется прежде всего для получения необходимой развязки между приемными каналами. Если все лучи работают одновременно, то величина паразитного сигнала, принятого с направлений, соответствующих соседним лучам, непосредственно определяется средним уровнем боковых лепестков каждого из приемных лучей в направлении соседних. Этот уровень должен

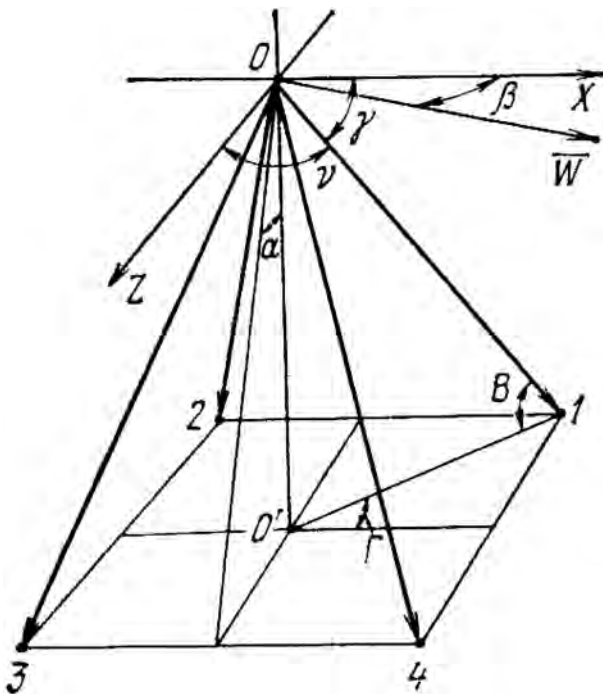


Рис. 306

быть не более 20—25 дБ. Если лучи работают поочередно, т. е. коммутируются, связей между каналами через боковые лепестки можно не опасаться и жестких ограничений на боковые лепестки в направлении соседних лучей не накладывается. Однако, независимо от режима работы лучей, важно обеспечить малый уровень лепестков в направлениях, близких к вертикали, так как на этих углах отражение от местности возрастает, особенно при работе над морем, и при наличии больших лепестков возникают паразитные отраженные сигналы. Как известно, дальние лепестки у антенны возникают из-за рассеянных полей, которые присущи любой реальной антенне. Эти рассеянные поля могут вызвать серьезные помехи при работе ДИСС в режиме непрерывного излучения. Отражаясь от вибрирующих элементов конструкции, они модулируются по амплитуде и фазе, создавая в приемном канале помехи, аналогичные полезным сигналам. Сказанное особенно опасно для ДИСС, устанавливаемых на летательных аппаратах, у которых требуется измерять малые скорости, так как при этом доплеровские частоты оказываются соизмеримыми с частотами механических вибраций. Поэтому при размещении антенны необходимо учитывать распределение рассеянных полей в пространстве, в частности необходимо, чтобы вибрирующие элементы конструкции не попадали в поле антенны или были защищены поглощающими материалами.

Естественно, что антенное устройство ДИСС, как и все другие блоки измерителя, должно иметь минимально возможные габариты и вес, должно быть удобно и надежно в эксплуатации.

Неподвижные антенны применяются практически во всех современных ДИСС с когерентным приемом. Неподвижные антенны значительно проще по конструкции, имеют меньший вес и большую надежность. Для их размещения на ЛА требуется меньший объем и меньшая площадь обтекателя, чем при применении подвижных антенн.

Автором во время работы в НИИ-17 в начале 60-х годов была предложена и разработана конструкция двухзеркального апланата в качестве альтернативы традиционной волноводно-щелевой антенны для доплеровского измерителя скорости и угла сноса летательных аппаратов. Антенна имела следующие геометрические параметры: диаметр  $D = 300$  мм, осевой размер  $d = 90$  мм, фокусное расстояние  $f = 165$  мм. Антенна имела 3 луча, направленные под углом  $25^\circ$  к оси антенны. Рассмотрим aberrации антенны при отклонении луча на этот угол. Поскольку техническим заданием предполагалось, что антенна должна была иметь минимальный осевой размер, то пришлось искать компромисс между допустимыми aberrациями и отношением  $f/d$ . Такой компромисс был найден при  $f/d = 1,8$ .

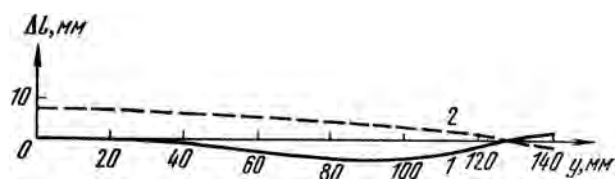


Рис. 307



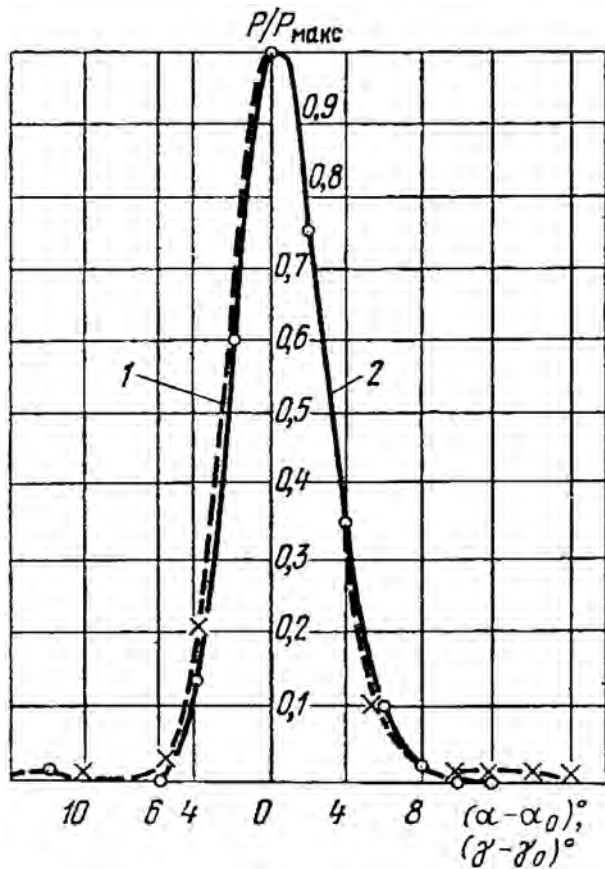
Рис. 308

Основная проблема состояла в компенсации значительного астигматизма, который имеет место в данном варианте антенны: фокус в меридиональном сечении не совпадает с фокусом в сагиттальном сечении: фокус в меридиональном сечении находится в точке с координатами  $x = 16$  мм,  $y = 68,5$  мм. Фокус сагиттального сечения находится в точке  $x = 0$ ,  $y = 70,5$  мм (система координат такая же, как на рис. 267 при  $M = 0$ ). На рис. 307 показано сечение волнового фронта в меридиональной (1) и сагиттальной (2) плоскостях при расположении в меридиональном фокусе. На рис. 308 аналогичные кривые приведены для расположения источника в сагиттальном фокусе. На этих рисунках  $\Delta L$  — разность хода произвольного луча и луча, идущего через центр раскрыва. Очевидно, преобладающей aberrацией является астигматизм, равный 18 мм, что соответствует расстоянию между меридиональным и сагиттальным фокусами. Устранить это расхождение можно с помощью специального астигматического облучателя, у которого фазовые центры в плоскостях  $E$  и  $H$  не совпадают (рис. 309).

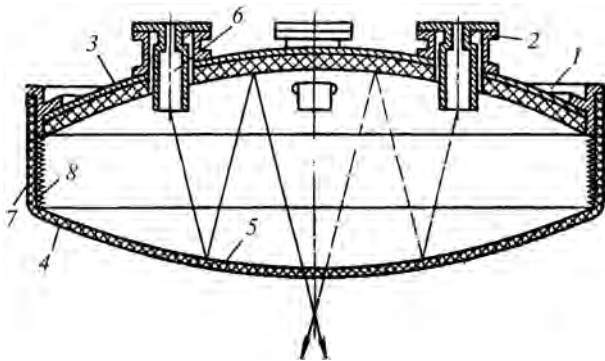


Рис. 309





**Рис. 310**  
**Экспериментальные диаграммы направленности**  
**апланатической антенны  $D = 15\lambda$  при угле**  
**отклонения  $25^\circ$ :**  
*1* — плоскость  $\alpha$ ; *2* — плоскость  $\gamma$



**Рис. 311**

На рис. 310 приведены экспериментальные диаграммы направленности трехлучевой апланатической антенны с подобным облучателем в плоскости углов  $\gamma$  (кривая 2) и  $\alpha$  (кривая 1). Антенна имеет следующие параметры:  $D = 300$  мм,  $h = 90$  мм, угол отклонения луча от вертикали —  $25^\circ$ .

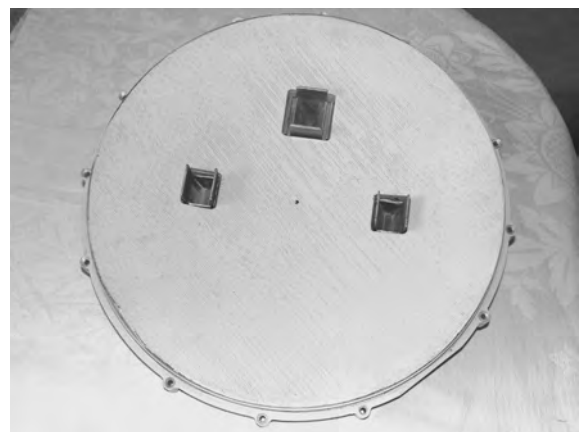
На рис. 311 показана ее конструкция. Зеркало 1 этой антенны представляет собой отлитую деталь с тремя стаканами 2 из алюминиевого сплава. Четвертьволновый слой 3 выполнен из



**Рис. 312**



**Рис. 313**

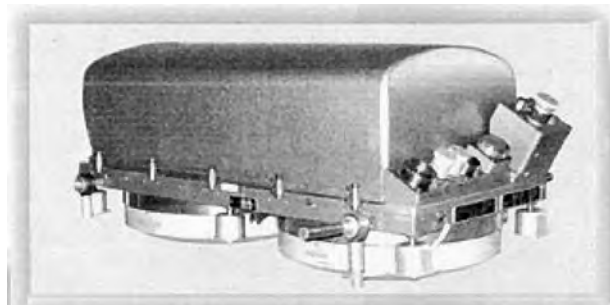


**Рис. 314**

сотового материала. Зеркало 4 изготовлено из стеклотекстолита толщиной 1,8 мм. Рабочая поверхность зеркал оклеена армированной стеклотканью 5. Для увеличения коэффициента прохождения в стеклотекстолит зеркала 4 запрессована просветляющая сетка. В стаканах главного зеркала установлены рупорные облучатели 6 с дополнительными пластинами. Зеркало 1 снабжено цилиндрической обечайкой 7. На внутреннюю поверхность обечайки приклеен поглощающий

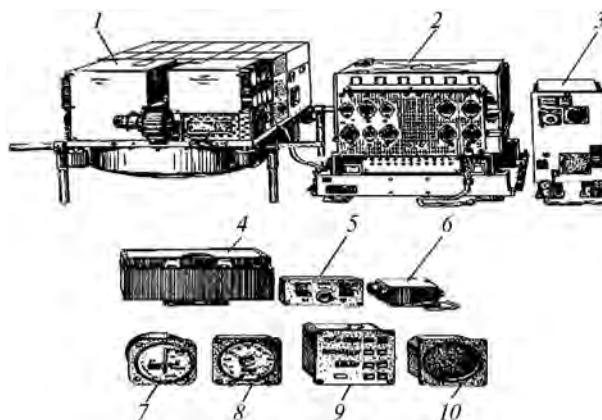


**Рис. 315**



**Рис. 316**  
**Приемопередатчик ВЧ**

материал 8. Обечайка уменьшает боковое рассеяние, благодаря чему увеличивается развязка между приемной и передающей антеннами. При расстоянии между краями антенн, равном 25—30 мм, развязка составляет около 80 дБ, а при расстоянии 60 мм — около 85 дБ. Установка до-



**Рис. 317**  
**Общий вид**

1 — высокочастотный блок (блок ВЧ); 2 — низкочастотный блок (блок НЧ); 3 — вычислитель координат (блок 5); 4 — картографический индикатор (блок 10); 5 — пульт контроля (прибор ПК); 6 — соединительная коробка картографического индикатора (прибор СК—КИ); 7 — индикатор висения и и малых скоростей (блок 6); 8 — индикатор путевой скорости и угла сноса (блок 7); 9 — индикатор координат (блок 8); 10 — блок связи (блок 9М)

полнительной перегородки, выступающей на 10—15 мм за раскрыв антенны, улучшает развязку до величины 85—90 дБ. Масса одной антенны составляет 1,8 кг.

На фотографиях рис. 312, 313, 314 показана описанная антенна в разных ракурсах. А на фотографии рис. 315 показан ДИСС ШО-13, серийно производимый на Рыбинском заводе и устанавливаемый на ряде летательных аппаратов. На рис. 316 показан ДИСС-1, а на рис. 317 представлен еще один вариант измерителя с двухзеркальной апланатической антенной.

Наличие астигматизма в антеннах с качанием диаграммы направленности требует не только учета искажений и оптимизации параметров в меридиональной плоскости, но и учета искажения в сагиттальном (перпендикулярном) сечении антенны, а также выбора оптимальной фокусной точки сразу для двух этих сечений антенны.

В случае астигматического волнового фронта (рис. 318, а) его меридиональное сечение МСМ имеет своим центром точку  $m$ , а сагиттальное сечение  $SCS$ , повернутое на  $90^\circ$  и перенесенное в плоскость чертежа, имеет своим центром точку  $G$ . Отрезок  $Gm = \Delta$  называется астигматической разностью.

Как видно, волновая поверхность заключена в пределах между сферами  $MCM$  и  $SCS$ , расстояние между которыми равно  $BC$ . Астигматизм допустим и удовлетворяет условию Релея в том случае, если  $BC \leq \lambda/4$ . Для параболической поверхности  $BC \approx (H^2/2f_2)\Delta = \Delta(A^2/8)$ , где  $H = D/2$ ,  $A = D/f$ ,  $f$  — фокусное расстояние, равное отрезку  $CG$  или  $Cm$ , что безразлично в связи с относительной малостью астигматической разности  $\Delta$  (т. е. фокусное расстояние есть расстояние, определяющее кривизну волнового фронта).

Приравнявая  $BC = \lambda/4$ , получим  $\Delta_{\max} = (2/A^2)\lambda$ . Из этой формулы видно, что при большом отношении  $f/D$  допустимый астигматизм больше, чем при малом  $f/D$ .

Пусть параболическое зеркало  $BCB$  (рис. 318, б) имеет своим главным фокусом точку  $F$ . Тогда фокальная кривая в меридиональном сечении будет  $MFM$ , а в сагиттальном сечении — гауссова плоскость  $SFS$ . Для некоторого угла наклона параллельного пучка  $\alpha$  меридиональный и сагиттальный фокусы располагаются соответственно в точках  $A_m$  и  $A_s$ ; в гауссовой плоскости изображение превратится в радиально направленную фокаль длиной  $2a = A\alpha^2 f$ . Отрезок  $A_m A_s = 2a/A = \alpha^2 f$ , поэтому кривизна  $1/R_m$  поверхности  $MFM$  определится как

$$\frac{1}{R_m} = \frac{2}{f} = \frac{4}{R}.$$

Если выбрать фокальную кривую в виде  $KFK$ , то кружок рассеяния будет иметь диаметр

$$d = \frac{A\alpha^2 f}{2}.$$

В оптике астигматизм удается исправить только в двухлинзовом объективе, например

в объективе Петцваля, в котором астигматизм исправлен для одного угла поля зрения  $\alpha_0$ .

Рассмотрим возможности уменьшения астигматизма в зеркальной антенне. Для этого используем приближенные методы, применяемые при исследовании aberrаций зеркальных телескопов и объективов в оптике.

Как известно, aberrации произвольной зеркальной системы суть:

$$B = \sum_{i=1}^k h_i^4 \left( \frac{b_i}{r_i^3} + \frac{\mu_i^2}{r_i} \right),$$

$$C = \sum_{i=1}^k h_i^2 H_i^2 \left( \frac{b_i}{r_i^3} + \frac{L_i^2}{r_i} \right),$$

$$D = \sum_{i=1}^k h_i^2 H_i^2 \left( \frac{b_i}{r_i^3} + \frac{\mu_i(2L_i - \mu_i)}{r_i} \right),$$

$$E = \sum_{i=1}^k h_i H_i^3 \left( \frac{b_i}{r_i^3} + \frac{L_i(2\mu_i - L_i)}{r_i} \right),$$

$$F = \sum_{i=1}^k h_i^3 H_i \left( \frac{b_i}{r_i^3} + \frac{L_i \mu_i}{r_i} \right).$$

Здесь  $B$  и  $F$  — сферическая aberrация и кома,  $C$  и  $D$  определяют сагиттальную и меридиональную кривизны поля изображения,  $E$  — дисторсия,  $r_i$  — радиус кривизны зеркал,  $\mu$  и  $L$  — инварианты Аббе,  $b_i$  — асферичность  $i$ -й поверхности. Расстояние  $h_i$  определяет расстояние от оси, на котором параксиальный луч, выходящий из осевой точки предмета, пересекает  $i$ -ю поверхность, расстояние  $H_i$  определяет расстояние от оси до точки пересечения этим лучом раскрыва системы.

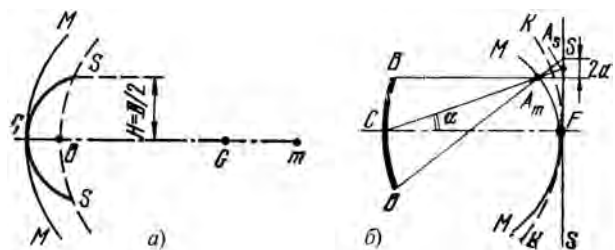


Рис. 318

Условие исправления сферической аберрации и комы двухзеркальной системы имеет вид

$$B = h_1^4 \left( \frac{b_1}{r_1^3} + \frac{k_1}{r_1} \right) + h_2^4 \left( \frac{b_2}{r_2^3} + \frac{k_2}{r_2} \right) = 0, \quad (55)$$

$$F = h_1^3 H_1 \left( \frac{b_1}{r_1^3} + \frac{k_1 L_1}{r_1} \right) + h_2^3 H_2 \left( \frac{b_2}{r_2^3} + \frac{k_2 L_2}{r_2} \right) = 0. \quad (56)$$

Астигматизм и кривизна поля в меридиональной плоскости будут соответственно

$$C - D = 1/r_1 + 1/r_2,$$

$$D = h_1^2 H_1^2 \left[ \frac{b_1}{r_1^3} + \frac{1}{r_1} k_1 (2L_1 - k_1) \right] + h_2^2 H_2^2 \left[ \frac{b_2}{r_2^3} + \frac{1}{r_2} k_2 (2L_2 - k_2) \right]. \quad (57)$$

Выражая  $b_1$  и  $b_2$  через  $B$  и  $F$  из (55) и (56) и подставляя в (57), получим

$$C - D = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2},$$

$$D = \frac{d}{1 - 2d/r_1} \left[ -\left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} - \frac{2d}{r_1 r_2} \right)^2 + \frac{2}{r_1^2} \right].$$

Исключая из этих формул  $r_2$  с помощью соотношения

$$\frac{1}{f} = \frac{2}{r_1} + \frac{2}{r_2} - \frac{4d}{r_1 r_2},$$

имеем

$$D = \frac{d}{1 - 2d/r_1} \left( \frac{2}{r_1^2} - \frac{1}{4f^2} \right). \quad (58)$$

$$C = \frac{1}{4f^2} \left( \frac{2f - d}{1 - 2d/r_1} \right). \quad (59)$$

Согласно условию Петцваля система не имеет искажений, если при  $B = F = 0$  (нет комы и сферической аберрации) выполняется условие

$$C - D = \sum_{i=1}^k 1/r_i = 0,$$

т. е. фокальная кривая прямолинейна и совпадает в обоих сечениях — сагиттальном и меридиональном. Тогда из (58) и (59) получим

$$d = 2f, \quad r_1 = \pm 2f.$$

Расстояние от вспомогательного зеркала до источника есть

$$-s'_2 = f \left( 1 - \frac{2d}{r_1} \right).$$

Принимая  $r_1 = -2\sqrt{2}f$  (т. е. главное зеркало выпуклое), мы должны, согласно условию Петцваля, считать, что  $r_2 = 2f$ , т. е. вспомогательное зеркало вогнутое. Для  $-s'_2$  имеем тогда

$$-s'_2 = (1 - \sqrt{2})f,$$

т. е. источник находится за главным зеркалом. Полученная система ( $r_2 = 2\sqrt{2}f$ ,  $d = 2f$ ,  $r_1 = -2\sqrt{2}f$ ,  $-s'_2 = (1 - \sqrt{2})f$ ) является апланатической, имеет плоское поле изображения и не имеет астигматизма — рис. 319. На этом рисунке  $I$  и  $II$  — вспомогательное и главное зеркала,  $F$  — фокус,  $f$  — фокусное расстояние.

Наиболее важный практический вывод, который можно сделать из этого результата, заключается в том, что у всех систем, у которых  $s'_2 = d$ , астигматизм будет тем меньше, чем меньше фокусное расстояние. Так, при  $f = d$  фокальная поверхность уже достаточно близка к плоскости и соответствующая апланатическая антенна в значительной степени свободна от астигматизма. Техника СВЧ позволяет достаточно эффективно бороться с астигматизмом при помощи специальных облучателей (рис. 309), у которых фазовые центры в двух взаимно перпендикулярных плоскостях не совпадают в пространстве.

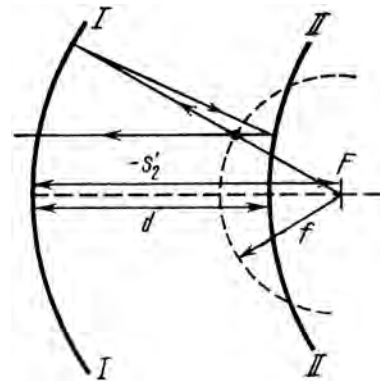


Рис. 319

## ДВУХЗЕРКАЛЬНЫЕ НЕОСЕССИММЕТРИЧНЫЕ АНТЕННЫ. СХЕМЫ И ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Достижения в области теории и практики осесимметричных антенн, а также их определенные недостатки закономерно привели к созданию неосесимметричных двухзеркальных антенн (НДА) самых разных модификаций по крайней мере на бумаге. Отсутствие затенения апертуры главного зеркала существенно снижает уровень боковых лепестков, а комбинация двух зеркал позволяет также уменьшить уровень кросс-поляризованного излучения.

В принципе, НДА могут в той или иной степени решать те же электродинамические задачи, что и осесимметричные антенны, однако их конструктивные особенности требуют от разработчика (конструктора, механика, технолога, ...) гораздо большей изобретательности, чтобы увидеть и реализовать полезные особенности неосесимметричных антенн. Недаром в мире существуют сотни осесимметричных антенн самого разного размера и назначения, а неосесимметричные двухзеркальные антенны пока что существуют в основном на бумаге. В этой связи нам представляется наиболее перспективным предложить такие схемы НДА, которые, например в радиолокации могли бы более эффективно решать практические задачи.

Замечательные сканирующие свойства апланатов, продемонстрированные в предыдущем разделе, наиболее полно реализуются только в антеннах с поворотом плоскости поляризации с соизмеримыми по размерам главным и вспомогательным зеркалами. Такие антенны имеют ограничения по полосе частот и поляризации. Поэтому вполне естественно желание многих разработчиков антенн найти такие конструкции зеркал, которые могли бы быть пригодны для широкоугольного сканирования в большой полосе частот и без ограничения по поляризации поля. Такими розами почти без шипов оказались неосесимметричные однозеркальные — офсетные антенны, простейшей из которых является вырезка из параболоида вращения с вынесенным фокусом. Однако такая антенна непригодна для эффективного сканирования и наличие только одной отражающей поверхности не дает возможности для оптимизации формы диаграммы направленности.

Однако, если в осесимметричных антеннах проблемой является взаимное затенение зеркал,

то в неосесимметричных антеннах проблемой становится суммарный размер антенны по отношению к действующему раскрытию, т. е. на первый план выходит не столько электродинамика, сколько сопромат, потому что можно придумать самые экзотические варианты неосесимметричных антенн, но реализовать их на практике окажется невозможным. Очевидно, что наиболее перспективной и востребованной окажется только такая неосесимметричная антенна, в которой будут оптимально учтены как требования электродинамики, так и сопромата.

Наиболее очевидной неосесимметричной антенной без взаимного затенения зеркал является антенна, получаемая их схемы Грегори, в которой используется верхняя часть главного зеркала и нижняя часть вспомогательного зеркала. Очевидно, можно получить такую же конфигурацию из комбинации параболического, гиперболического и эллиптического зеркал. Вариации на ту же тему представлены на рис. 320.

Как видно, неосесимметричные антенны могут строиться как по предфокальной (типа Кас-

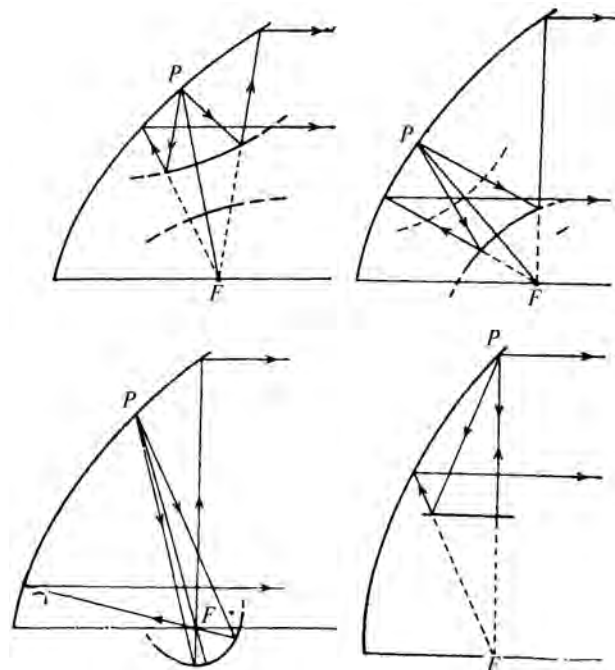


Рис. 320

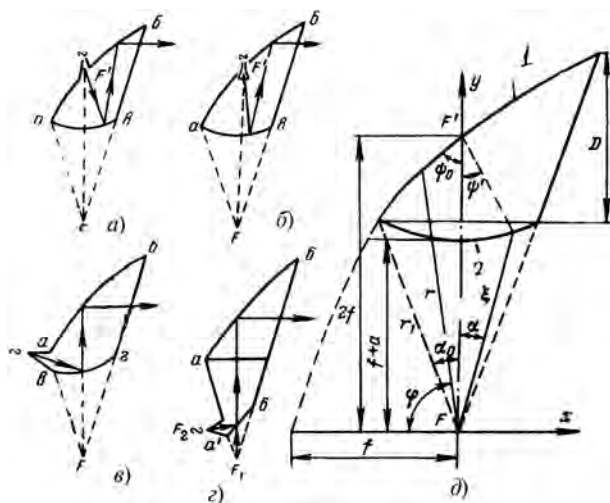


Рис. 321

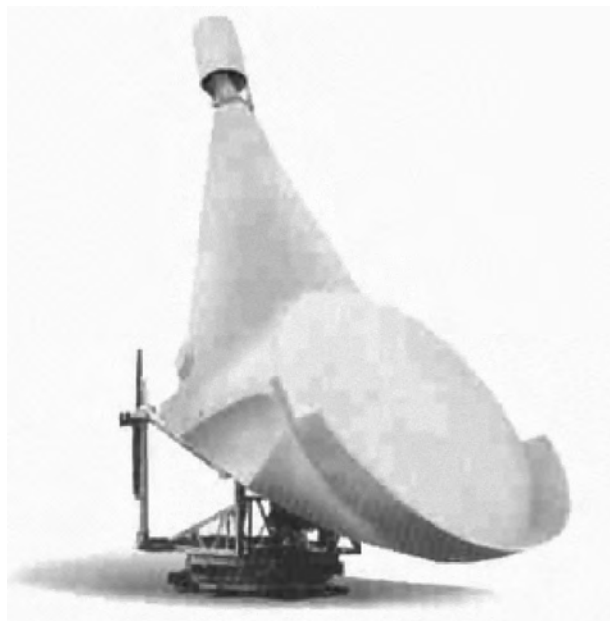


Рис. 322

сегрена), так и по зафокальной (типа Грегори) схемам.

Одним из наиболее оптимальных вариантов по радиотехническим и конструктивным параметрам антенн является антенна, которая получила название "раковина" из-за своей характерной формы. К ней можно перейти от рупорно-параболической антенны (рис. 321). На этом рисунке 1 — сечение параболеоида, 2 — сечение гиперболеоида, один из фокусов которого совпадает с фокусом параболеоида  $F$ , а во втором находится облучатель, который для удобства крепления находится на или вблизи параболеоида, что исключает необходимость в установке консолей. Ввиду горизонтального расположения

вспомогательного зеркала, оно не лежит на пути лучей, и отсутствуют ограничения на систему крепления для него. Обе поверхности имеют общую точку, что обеспечивает замкнутость конструкции. Такие антенны рассматриваются как возможные малозумящие антенны для радиотелескопов, и могут быть эффективно использованы для целей радиолокации и в качестве многолучевых антенн спутниковой связи. Примером действующей антенны типа "Раковина" является антенна на земной станции спутниковой связи Андовер. Для предварительной оценки геометрических параметров "Раковины" из рис. 321 можно получить следующие соотношения: размер раскрыва  $D$ , выраженный через угол  $2\alpha_0$ , равен  $D = 4f \operatorname{tg} \alpha_0$ , где  $f$  — фокусное расстояние исходной параболы  $r = 2f / (1 + \cos \varphi)$ . Угол  $2\psi_0$ , определяющий ширину ДН облучающего рупора, связан с углом раскрыва рупора  $\alpha_0$  соотношением  $\psi_0 = \operatorname{arctg} [\sin \alpha_0 / (1 + \sin \alpha_0 - \cos \alpha_0)]$ . Уравнение гиперболы, образующей вспомогательное зеркало,  $\rho = (f^2 - a^2) / (a + f \cos \psi)$ , где  $a = [f(\sin \psi_0 - \sin \alpha_0)] / [\sin \psi_0(1 + \sin \alpha_0)]$ . Контуры раскрыва главного и вспомогательного зеркал зависят от того, как выполнен размер исходной РПА: в случае пирамидального рупора с плоскими стенками раскрыв выглядит как на рис. 26, 26, а, 26, б. Этот случай достаточно удобен в конструктивном отношении, т. к. оба зеркала могут быть связаны плоскими решетками или щитами. Возможна также конфигурация как на рис. 322 и 323. Геометрия "Раковины" открывает новые конструк-

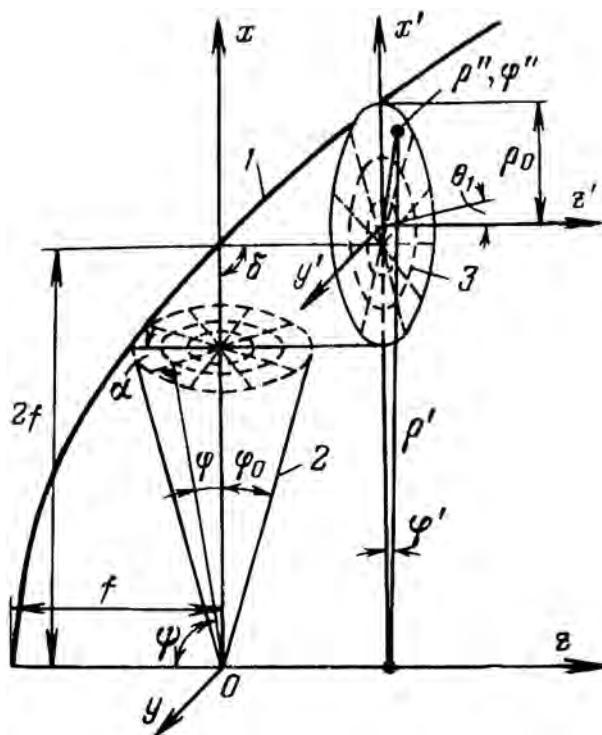


Рис. 323

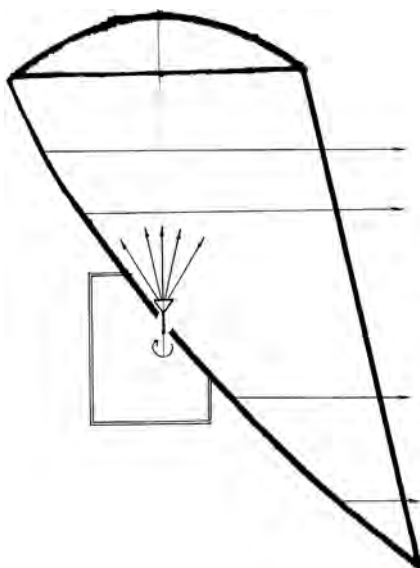


Рис. 324

тивные возможности перед разработчиками антенн, решающими не только теоретические, но и практические задачи. Например, располагая антенну так, как показано на рис. 324, можно обеспечить круговое вращение антенны по азимуту в режиме поиска и обнаружения цели при неподвижном облучателе вокруг вертикальной оси. Сами профили зеркал могут быть рассчитаны так, чтобы ДН в угломестной плоскости имела вид  $\text{cosec}^2\theta$ . Геометрию антенны можно подобрать так, что ось вращения будет проходить через ее центр тяжести, что существенно упрощает систему подвеса и вращения антенны.

В случае секторного угломестного качания горизонтальная ось также может проходить через центр тяжести, что также конструктивно очень удобно. Наконец, раскрыв "Раковины" может быть закрыт радиопрозрачной крышкой, как это делается в РПА, используемых в качестве радиорелейных антенн.

## НЕОПЛАНАТЫ

Двухзеркальные неосесимметричные апланатические антенны [9, 10], для краткости неопланаты, в своей основе имеют условие отсутствия аберраций — условие синусов Аббе. Это условие, как уже отмечалось, было получено для линзовых объективов в случае, когда объект и его изображения находятся на конечном расстоянии от объектива. В дальнейшем это условие было обобщено на случай телескопических систем, когда объект наблюдения находится в "бесконечности", а его изображение — на конечном расстоянии от объектива — будь это линза, система линз или зеркал, но в любом случае

подсознательно предполагалось, что это были осесимметричные системы, хотя в принципе при выводе условия синусов никаких специальных ограничений на осевую симметрию системы не накладывалось. Во времена отцов-основателей не было сканирующих антенн и тем более неосесимметричных. Если же мы хотим создать неосесимметричную антенну, да еще облучаемую неточечным источником, привычное условие апланатизма необходимо модернизировать. Для этого можно использовать уравнение баланса энергий  $P(\varphi) \sin\varphi d\varphi = P(y) y dy$ . Тогда

$$P(y) = \frac{P(\varphi) \sin\varphi}{y \frac{dy}{d\varphi}}.$$

Поскольку у апланатических антенн  $y = f \sin\varphi$ , то  $P(y) = P(\varphi)/f \cos\varphi$ . Так как уравнение баланса энергий само по себе справедливо при любом взаимном расположении расходящихся лучей на входе и параллельных лучей на выходе, то антенна будет апланатической, если в ее раскрыве распределение поля  $P(y)$  определяется полученным соотношением. Это соотношение является наиболее универсальным условием апланатизма.

В наиболее общем случае расчет поверхностей трехмерных зеркал с заданным распределением поля в раскрыве сводится к решению системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных типа уравнений Пфаффа.

Получив достаточно четкое представление о возможных вариантах неопланатов, можно говорить о практической реализации какого-то конкретного варианта. Реализация неопланатов связана, прежде всего, с построением поверхностей зеркал — главного и вспомогательного в соответствии с той задачей, которая стоит перед разработчиком антенны. Среди задач, решаемых с помощью неопланатов, можно выделить следующие основные: построение антенны с максимальным КНД (с заданным амплитудным распределением в раскрыве), с заданной формой поперечного сечения луча (с контурной зоной обслуживания), с ДН типа  $\text{cosec}^2\theta$  для обзорных РЛС и антенны со сканированием для РЛС поиска и сопровождения целей. Если первые две задачи имеют скорее диссертательный характер, то две вторые имеют вполне конкретную практическую ценность в настоящее время и в перспективе.

Построение НОА с ДН типа  $\text{cosec}^2\theta$  можно решать либо с одиночным облучателем, но с профилированными зеркалами, либо с простейшими зеркалами, но с двумя—тремя коммутируемыми облучателями.

Для создания сканирующей антенны требуется так рассчитать главное и вспомогательное зеркало, чтобы при сканировании в заданном секторе углов искажения были минимальны. Перейдем к рассмотрению именно таких антенн.

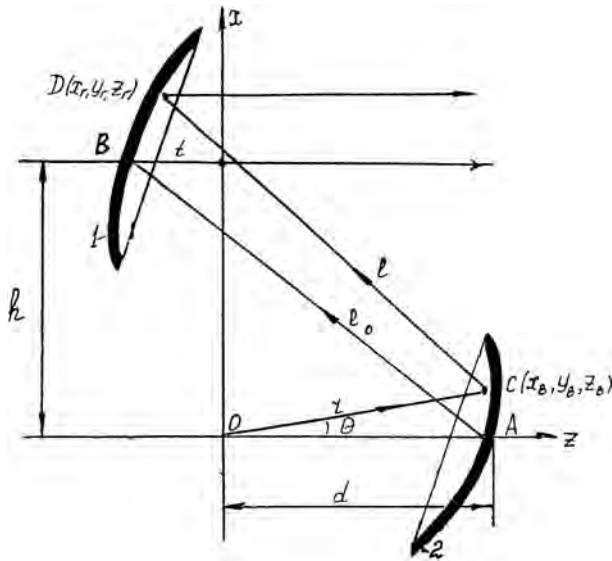


Рис. 325

Схема двухзеркальной неосесимметричной антенны с точечным облучателем представлена на рис. 325. Здесь 1 — главное зеркало, 2 — вспомогательное зеркало; облучатель расположен в начале координат — в точке  $O$ . В этой точке расположено начало прямоугольных и сферических координат: вспомогательное зеркало удобнее рассчитывать в сферических координатах, а главное — в прямоугольных.

Будем предполагать, что расстояние от облучателя до вспомогательного зеркала вдоль оси  $Z$  равно  $d$  и луч, идущий вдоль этой оси, отражается главным зеркалом в точке  $B$  на расстоянии  $h$  от оси  $Z$  и на расстоянии  $l_0$  от точки  $A$ .

Лучи, выходящие из точки  $O$ , можно характеризовать единичным вектором  $\bar{a}_{обл}$ :

$$\bar{a}_{обл} = \bar{i} \sin\theta \cos\varphi - \bar{j} \sin\theta \sin\varphi + \bar{k} \cos\theta.$$

Направление луча, отраженного от вспомогательного зеркала, можно найти из закона Снеллиуса в векторной форме:

$$\bar{a}_{в.отр} = \bar{a}_{обл} - 2\bar{n}_B (\bar{a}_{обл} \bar{n}_B), \quad (60)$$

где  $\bar{a}_{в.отр}$  — единичный вектор, направленный вдоль луча, отраженного от вспомогательного зеркала,  $\bar{n}_B$  — единичная нормаль к поверхности вспомогательного зеркала.

Поскольку форма вспомогательного зеркала, как и главного зеркала, пока еще неизвестна, то неизвестно и направление нормали  $\bar{n}_B$  и нельзя в явном виде найти направление вектора  $\bar{a}_{в.отр}$ . Поэтому применим следующий прием — зададим направление луча, отраженного от вспомогательного зеркала с помощью углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , величина которых может быть найдена только после выполнения всего расчета. Угол  $\beta_2$  образован вектором  $\bar{a}_{в.отр}$  и плоскостью  $XOZ$ , а угол

$\beta_1$  образован проекцией этого вектора на плоскость  $XOZ$  с осью  $OZ$ . Тогда

$$\bar{a}_{в.отр} = \bar{i} \cos\beta_2 \sin\beta_1 - \bar{j} \sin\beta_2 - \bar{k} \cos\beta_2 \cos\beta_1.$$

Использование векторного способа задания падающих и отраженных лучей в двухзеркальной антенне является наиболее общим подходом к решению поставленной задачи, однако, это неизбежно приводит к таким понятиям, как частные производные по координатам поверхностей, поскольку компоненты единичных нормалей к поверхностям определяются частными производными в точках падения и отражения лучей.

Введение полных дифференциалов для главного и вспомогательного зеркал приводит к образованию системы из 2-х нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных относительно двух независимых переменных. Действительно, неизвестная поверхность вспомогательного зеркала является в общем случае функцией 2-х переменных:  $z_B = z(x_B, y_B)$ . Полный дифференциал этой функции имеет вид:

$$dz_B = \frac{\partial z_B}{\partial x_B} dx_B + \frac{\partial z_B}{\partial y_B} dy_B. \quad (61)$$

Для определения входящих в (61) частных производных, учтем, что вектор  $\bar{n}_B$  имеет составляющие

$$n_{Bx} = -\frac{1}{|\bar{n}_B|} \left( \frac{\partial z_B}{\partial x_B} \right)^1; \quad n_{By} = -\frac{1}{|\bar{n}_B|} \frac{\partial z_B}{\partial y_B}; \quad n_{Bz} = \frac{1}{|\bar{n}_B|};$$

где

$$|\bar{n}_B| = \sqrt{\left( \frac{\partial z_B}{\partial x_B} \right)^2 + \left( \frac{\partial z_B}{\partial y_B} \right)^2 + 1}.$$

Здесь  $n_{Bx}$ ,  $n_{By}$ ,  $n_{Bz}$  — косинусы углов нормали  $\bar{n}_B$  с осями  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  соответственно.

Тогда выражение (61) можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} 1. \cos\beta_2 \sin\beta_1 &= \sin\theta \cos\varphi - 2(a_{обл x} n_{Bx} + \\ &+ a_{обл y} n_{By} + a_{обл z} n_{Bz}) \left( -\frac{1}{|\bar{n}_B|} \frac{\partial z_B}{\partial x_B} \right); \\ 2. \sin\beta_2 &= \sin\theta \sin\varphi + 2(a_{обл x} n_{Bx} + \\ &+ a_{обл y} n_{By} + a_{обл z} n_{Bz}) \left( -\frac{1}{|\bar{n}_B|} \frac{\partial z_B}{\partial y_B} \right); \\ 3. \cos\beta_2 \cos\beta_1 &= -\cos\theta + 2(a_{обл x} n_{Bx} + \\ &+ a_{обл y} n_{By} + a_{обл z} n_{Bz}) \frac{1}{|\bar{n}_B|}. \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

Разделив (62.1) на (62.3) и (62.2) на (62.3), получим:

$$\left. \begin{aligned} 1. \frac{\partial z_B}{\partial x_B} &= \frac{\sin\theta \cos\varphi - \cos\beta_2 \sin\beta_1}{\cos\beta_2 \cos\beta_1 + \cos\theta}. \\ 2. \frac{\partial z_B}{\partial x_B} &= \frac{\sin\theta \sin\varphi - \sin\beta_2}{\cos\beta_2 \cos\beta_1 + \cos\theta}. \end{aligned} \right\} \quad (63)$$



Чтобы найти значения  $dx_B$ ,  $dy_B$ , и  $dz_B$ , входящие в (63), учтем, что прямоугольные координаты поверхности главного зеркала  $x_B$ ,  $y_B$ ,  $z_B$  являются функцией сферических координат вспомогательного зеркала  $r$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ . Здесь  $r$  — радиус-вектор точки на вспомогательном зеркале,  $\theta$  — угол, образованный этим радиусом вектором с осью  $X$ .

Тогда

$$\begin{aligned} x_B &= r \sin \theta \cos \varphi, \\ y_B &= -r \sin \theta \sin \varphi, \\ z_B &= r \cos \theta. \end{aligned} \quad (64)$$

В соответствии с известным правилом определения полного дифференциала функции нескольких переменных,

если  $w = f(x, y, z, u, \dots, t)$ ,

$$\text{тогда } dw = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \dots + \frac{\partial f}{\partial t} dt.$$

Поэтому можно записать на основании (61):

$$\begin{aligned} dx_B &= \sin \theta \cos \varphi dr + r \cos \theta \sin \varphi d\theta - r \sin \theta \sin \varphi d\varphi, \\ dy_B &= -\sin \theta \sin \varphi dr - r \cos \theta \sin \varphi d\theta - r \sin \theta \cos \varphi d\varphi, \\ dz_B &= \cos \theta dr - r \sin \theta d\theta. \end{aligned} \quad (65)$$

Подставив (65) и (63) в (61), получим дифференциальное уравнение вспомогательного зеркала

$$\begin{aligned} (\cos \theta - A \sin \theta \cos \varphi + B \sin \theta \sin \varphi) dr_B &= \\ = r_B (\sin \theta + A \cos \theta \cos \varphi - B \cos \theta \sin \varphi) d\theta - \\ - r (A \sin \theta \sin \varphi + B \sin \theta \cos \varphi) d\varphi, \end{aligned} \quad (66)$$

$$A = \frac{\cos \beta_2 \sin \beta_1 - \sin \theta \cos \varphi}{\cos \beta_2 \cos \beta_1 + \cos \theta},$$

$$B = \frac{\sin \theta \cos \varphi - \sin \beta_2}{\cos \beta_2 \cos \beta_1 + \cos \theta}.$$

Здесь углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  связаны с координатами точек на главном и вспомогательном зеркалах соотношениями

$$1. \beta_1 = \arcsin \frac{x_\Gamma - x_B}{\sqrt{l^2 - (y_\Gamma - y_B)^2}}, \quad (67)$$

$$2. \beta_2 = \arcsin \frac{|y_\Gamma| - |y_B|}{l}.$$

Входящая сюда величина  $l$  содержится в уравнении

$$r + l - z_\Gamma = c,$$

которое представляет собой условие постоянства оптического пути вдоль произвольного луча от фокуса  $O$  до плоского фронта, совпадающего с плоскостью  $XOY$ . Здесь  $c = d + l_0 - t = \text{const}$ .

Рассмотрим теперь порядок расчета поверхности главного зеркала. Направление луча, отражаемого от этого зеркала, определяется единичным вектором

$$\bar{a}_{\Gamma, \text{отр}} = \bar{a}_{B, \text{отр}} - 2\bar{n}_\Gamma (\bar{a}_{B, \text{отр}} \cdot \bar{n}_\Gamma). \quad (68)$$

Поскольку этот луч выходит из антенны параллельно оси  $Z$ , то в выбранной системе координат он имеет только одну составляющую

$$\bar{a}_{\Gamma, \text{отр}} = \bar{k}. \quad (69)$$

Единичный  $\bar{a}_{B, \text{отр}}$  вектор имеет составляющие, определяемые соотношением (60), а единичная нормаль к поверхности главного зеркала, задаваемого в виде зависимости  $z_\Gamma = z_\Gamma(x_\Gamma, y_\Gamma)$  может быть, как и ранее, получена в виде

$$\bar{U}_\Gamma = -\frac{1}{|\bar{U}_\Gamma|} \frac{\partial z_\Gamma}{\partial x_\Gamma} \bar{i} - \frac{1}{|\bar{U}_\Gamma|} \frac{\partial z_\Gamma}{\partial y_\Gamma} \bar{j} + \bar{k} \frac{1}{|\bar{U}_\Gamma|}, \quad (70)$$

где

$$|\bar{U}_\Gamma| = \sqrt{\left(\frac{\partial z_\Gamma}{\partial x_\Gamma}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_\Gamma}{\partial y_\Gamma}\right)^2 + 1}.$$

С учетом (69) и (70) выражение (68) можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} 1. 0 &= \cos \beta_2 \sin \beta_1 - 2(a_{B, \text{отр}x} n_{\Gamma x} + \\ &+ a_{B, \text{отр}y} n_{\Gamma y} + a_{B, \text{отр}z} n_{\Gamma z}) \left(-\frac{1}{|\bar{U}_\Gamma|} \frac{\partial z_\Gamma}{\partial x_\Gamma}\right), \\ 2. 0 &= \sin \beta_2 + 2(a_{B, \text{отр}x} n_{\Gamma x} + \\ &+ a_{B, \text{отр}y} n_{\Gamma y} + a_{B, \text{отр}z} n_{\Gamma z}) \left(-\frac{1}{|\bar{U}_\Gamma|} \frac{\partial z_\Gamma}{\partial y_\Gamma}\right), \\ 3. 1 &= -\cos \beta_2 \cos \beta_1 - 2(a_{B, \text{отр}x} n_{\Gamma x} + \\ &+ a_{B, \text{отр}y} n_{\Gamma y} + a_{B, \text{отр}z} n_{\Gamma z}) \left(\frac{1}{|\bar{U}_\Gamma|}\right). \end{aligned} \right\} \quad (71)$$

Разделив (71.1) и (71.2) на (71.3), получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial z_\Gamma}{\partial x_\Gamma} &= \frac{\cos \beta_2 \sin \beta_1}{1 - \cos \beta_2 \cos \beta_1}, \\ \frac{\partial z_\Gamma}{\partial y_\Gamma} &= \frac{-\sin \beta_2}{1 + \cos \beta_2 \cos \beta_1}. \end{aligned} \right\} \quad (72)$$

Полный дифференциал для главного зеркала имеет вид

$$dz_\Gamma = \frac{\partial z_\Gamma}{\partial x_\Gamma} dx_\Gamma + \frac{\partial z_\Gamma}{\partial y_\Gamma} dy_\Gamma, \quad (73)$$

где координаты  $x_\Gamma$  и  $y_\Gamma$  выражаются через расстояние от центра раскрыва главного зеркала  $\rho$  и угол  $\theta$ :

$$\begin{aligned} x_\Gamma &= h + \rho \cos \theta, \\ y_\Gamma &= -\rho \sin \theta - \text{условие синусов.} \end{aligned} \quad (74)$$

Угол  $\theta$  характеризует направление луча, выходящего из облучателя, по отношению к оси  $OZ$  и  $\rho$  определяет его расстояние от оси раскрыва главного зеркала. Таким образом,  $x_\Gamma$  и  $y_\Gamma$  являются функцией переменных  $\theta$  и  $\varphi$  для дифференциалов  $dx_\Gamma$  и  $dy_\Gamma$ , входящих в (73), можно получить

$$\begin{aligned} dx_\Gamma &= \rho'(\theta) \cos \theta d\theta - \rho(\theta) \sin \theta d\theta, \\ dy_\Gamma &= -\rho'(\theta) \sin \theta d\theta - \rho(\theta) \cos \theta d\theta. \end{aligned} \quad (75)$$

Подставляя (72) и (75) в (73), получим следующее дифференциальное уравнение

$$dz_r = \rho'(\theta) \left( \frac{\sin \beta_2 \cos \varphi}{1 + \cos \beta_2 \cos \beta_1} - \operatorname{tg} \beta_1 \sin \varphi \right) d\theta + \\ + \rho(\theta) \left( \frac{\sin \beta_2 \sin \varphi}{1 + \cos \beta_2 \cos \beta_1} - \operatorname{tg} \beta_1 \cos \varphi \right) d\varphi.$$

Таким образом, окончательно получим систему из двух дифференциальных уравнений: для главного зеркала

$$dz_r = F \cos \theta \left( \frac{\sin \beta_1 \cos \varphi}{1 + \cos \beta_2 \cos \beta_1} - \operatorname{tg} \beta_1 \sin \varphi \right) d\theta + \\ + F \sin \theta \left( \frac{\sin \beta_2 \sin \varphi}{1 + \cos \beta_2 \cos \beta_1} - \operatorname{tg} \beta_1 \cos \varphi \right) d\varphi, \quad (76)$$

для вспомогательного зеркала

$$(\cos \theta - A \sin \theta \cos \varphi + B \sin \theta \sin \varphi) dr_B - \\ - r_B (\sin \theta + A \cos \theta \cos \varphi - B \cos \theta \sin \varphi) d\theta + \\ + r_B (A \sin \theta \sin \varphi + B \sin \theta \cos \varphi) d\varphi = 0,$$

$$A = \frac{\cos \beta_2 \sin \beta_1 - \sin \theta \cos \varphi}{\cos \beta_2 \cos \beta_1 + \cos \theta},$$

$$B = \frac{\sin \theta \sin \varphi - \sin \beta_2}{\cos \beta_2 \cos \beta_1 + \cos \theta}.$$

Здесь, согласно (67.1) и (67.2),

$$\beta_1 = \arcsin \frac{x_r - x_B}{\sqrt{l^2 - (y_r - y_B)^2}},$$

$$\beta_2 = \arcsin \frac{y_r - y_B}{l},$$

$$l = c - r_B - r_r.$$

Рассмотрим еще один метод расчета вспомогательного зеркала. Из (64) можно получить

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial x_B}{\partial \theta} &= \cos \varphi \left( \frac{\partial r}{\partial \theta} \sin \theta + r \cos \theta \right), \\ \frac{\partial x_B}{\partial \varphi} &= \sin \theta \left( \frac{\partial r}{\partial \varphi} \cos \varphi - r \sin \varphi \right), \\ \frac{\partial y_B}{\partial \theta} &= -\sin \varphi \left( \frac{\partial r}{\partial \theta} + r \cos \theta \right), \\ \frac{\partial y_B}{\partial \varphi} &= -\sin \theta \left( \frac{\partial r}{\partial \varphi} \sin \varphi + r \cos \varphi \right), \\ \frac{\partial z_B}{\partial \theta} &= \frac{\partial r}{\partial \theta} \cos \theta - r \sin \theta, \\ \frac{\partial z_B}{\partial \varphi} &= \cos \theta \frac{\partial r}{\partial \varphi}. \end{aligned} \right\} \quad (77)$$

Эти соотношения записаны с учетом того, что  $r$  зависит и от  $\varphi$  и от  $\theta$ . Поскольку  $Z$  есть функция  $x_B, y_B, \theta$  и  $\varphi$ , то можно записать

$$\frac{\partial z_B}{\partial \theta} = \frac{\partial z_B}{\partial x_B} \frac{\partial x_B}{\partial \theta} + \frac{\partial z_B}{\partial y_B} \frac{\partial y_B}{\partial \theta},$$

$$\frac{\partial z_B}{\partial \varphi} = \frac{\partial z_B}{\partial x_B} \frac{\partial x_B}{\partial \varphi} + \frac{\partial z_B}{\partial y_B} \frac{\partial y_B}{\partial \varphi}.$$

Подставим сюда значение из (77)

$$\frac{\partial r}{\partial \theta} \cos \theta - r \sin \theta = A \cos \varphi \left( \frac{\partial r}{\partial \theta} \sin \theta + r \cos \theta \right) + \\ + B (-\sin \varphi) \left( \frac{\partial r}{\partial \theta} + r \cos \theta \right), \quad (78)$$

$$\frac{\partial r}{\partial \varphi} \cos \theta = A \sin \theta \left( \frac{\partial r}{\partial \varphi} \cos \varphi - r \sin \varphi \right) - \\ - B \sin \varphi \left( \frac{\partial r}{\partial \varphi} \sin \varphi + r \cos \varphi \right), \quad (79)$$

$$\text{где } A = \frac{\sin \theta \cos \varphi - \cos \beta_2 \sin \beta_1}{\cos \beta_2 \sin \beta_1 + \cos \theta} = \frac{\partial z_B}{\partial x_B},$$

$$B = \frac{\sin \theta \sin \varphi - \sin \beta_2}{\cos \beta_2 \cos \beta_1 + \cos \theta} = \frac{\partial z_B}{\partial y_B}.$$

Уравнения (78) и (79) представляют собой систему дифференциальных уравнений в частных производных, которую необходимо решать совместно с уравнениями для главного зеркала. Для главного зеркала из соотношений:

$$x_r = h + F \sin \theta \cos \varphi,$$

$$y_r = -F \sin \theta \sin \varphi,$$

можно получить:

$$\frac{\partial z_r}{\partial \theta} = \frac{\partial z_r}{\partial y_r} \frac{\partial y_r}{\partial \theta} + \frac{\partial z_r}{\partial x_r} \frac{\partial x_r}{\partial \theta} = \\ = C_0 F \cos \varphi \cos \theta - D F \sin \varphi \cos \theta,$$

$$\frac{\partial z_r}{\partial \varphi} = \frac{\partial z_r}{\partial y_r} \frac{\partial y_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial z_r}{\partial x_r} \frac{\partial x_r}{\partial \varphi} = \\ = C_0 (-F \sin \theta \sin \varphi) - D F \sin \varphi \cos \varphi,$$

$$\text{где } C_0 = \frac{\cos \beta_2 \sin \beta_1}{1 + \cos \beta_2 \cos \beta_1} = \frac{\partial z_r}{\partial x_r},$$

$$D = \frac{-\sin \beta_2}{1 + \cos \beta_2 \cos \beta_1} = \frac{\partial z_r}{\partial y_r}.$$

Таким образом, получена система из 4-х дифференциальных уравнений в частных производных, которые необходимо решать совместно.

Для проверки правильности этих уравнений рассмотрим случай, когда несимметричная антенна переходит в осесимметричную. Это име-

ет место при  $h = 0$ . Рассмотрим сечение  $\varphi = 0$ ,  $\beta_2 = 0$ . Тогда из (66) получаем:

$$\frac{dr_B}{d\theta} (\cos\theta - A \sin\theta) = r_B (A \cos\theta + \sin\theta),$$

$$A = \operatorname{tg} \frac{\beta_1 - \theta}{2},$$

окончательно получим

$$\frac{dr_B}{d\theta} = r_B \operatorname{tg} \frac{\beta_1 + \theta}{2}.$$

Таким образом, уравнение (66) свелось к известному дифференциальному уравнению для радиус-вектора вспомогательного зеркала осесимметричной апланатической антенны.

Рассмотрим теперь уравнение (76), из которого получаем

$$\frac{dz_r}{d\theta} = \frac{F \cos\theta \sin\beta_1}{1 + \cos\beta_1}.$$

Для осесимметричной апланатической антенны, рассмотренной ранее, справедлива система:

1.  $\frac{1}{r} \frac{dr}{d\theta} = \operatorname{tg} \frac{\theta + \beta}{2},$
2.  $\sin\beta = \frac{f-r}{l} \sin\theta,$
3.  $r + l - z = 2d,$
4.  $z = r \cos\theta - l \cos\beta.$

Покажем, что справедливо равенство

$$\frac{dz}{d\theta} = \frac{f \sin\beta \cos\theta}{1 + \cos\beta}, \quad (81)$$

аналогичное уравнение  $\frac{dz_r}{d\theta}$  из (80.2)

$$l = \frac{(f-r) \sin\theta \cos\beta}{\sin\beta}. \quad (82)$$

Подставляя это значение  $l$  в (80.3) и (80.4)

$$z = r \cos\theta - \frac{(f-r) \sin\theta \cos\beta}{\sin\beta}, \quad (83)$$

$$z = r + \frac{1}{2} (f-r) \sin\theta \left[ \frac{(f-r) \sin\theta}{r(\cos\theta - 1) + 2d} + \frac{r(\cos\theta - 1) + 2d}{(f-r) \sin\theta} \right] - 2d.$$

Тогда из (82) и (83), подставив сюда значение  $r$  и освободившись от  $\beta$ , получим

$$z = r + \frac{1}{2} (f-r) \sin\theta \left[ \frac{(f-r) \sin\theta}{r(\cos\theta - 1) + 2d} + \frac{r(\cos\theta - 1) + 2d}{(f-r) \sin\theta} \right] - 2d. \quad (84)$$

Дифференцируя (84) по  $\theta$ , после ряда преобразований получаем равенство (81).

Таким образом, уравнения (66) и (76) справедливы и для осесимметричной апланатической антенны, которая является частным случаем неосесимметричной антенны.

Рассмотрим далее некоторые упрощенные методы расчета и построения неопланатов для оперативного исследования их параметров в процессе сканирования.

Этот метод обычно применяется в тех случаях, когда полученные дифференциальные уравнения не удается решить в квадратурах, а также в процессе предварительных исследований антенны.

Согласно методу касательных главное и вспомогательное зеркала рассчитываются путем последовательного определения отрезков касательных к профилям зеркал. При этом зависимость между направлением лучей источника ( $\varphi$ ) и расположением соответствующих коллимированных лучей ( $\psi$ ) или известна в явном виде ( $\psi = f(\varphi)$ ), или задается в виде таблицы.

Построение профиля по методу касательных производится следующим образом (рис. 326). Пусть имеется начальная точка  $M_i(x_{M_i}, y_{M_i})$  на малом зеркале и соответствующая точка  $B_i(x_{B_i}, y_{B_i})$  на большом, и также задано положение облучателя и известна зависимость между  $y_{B_i}$  и  $\varphi_i$ .

Проведем луч  $FM_i B_i A_i$ , а затем биссектрисы  $N_{B_i} B_i$  и  $N_{M_i} M_i$ . Перпендикуляры к этим биссектрисам являются касательными к зеркалам в точках  $M_i, B_i$ .

Возьмем теперь новое значение угла  $\varphi_{i+1}$ , мало отличающееся от угла  $\varphi_i$ , и проведем из фокуса луч до пересечения с касательной в точке  $M_{i+1}$ . На основании известной зависимости  $y_B$  от  $\varphi$  определяется приращение  $h$  ординаты

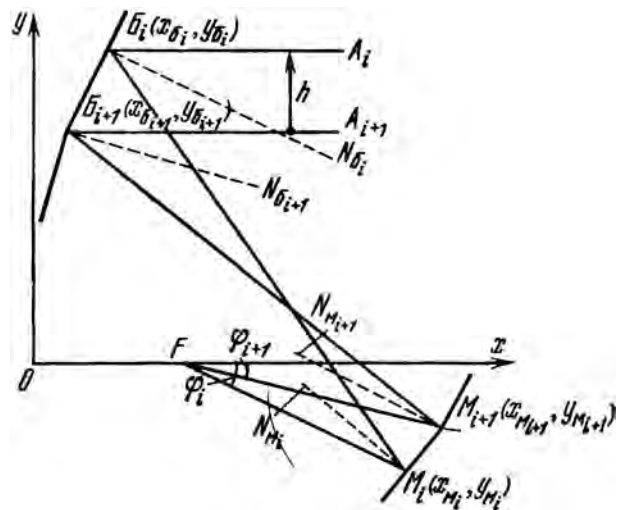


Рис. 326

большого зеркала и проводится горизонтальный луч до пересечения с касательной к большому зеркалу в точке  $B_{i+1}$  ( $x_{B_{i+1}}$ ,  $y_{B_{i+1}}$ ). Далее строятся биссектрисы  $N_{B_{i+1}} B_{i+1}$  и  $N_{M_{i+1}} M_{i+1}$ , нормали к этим биссектрисам образуют касательные к зеркалам. Этот процесс повторяется до полного построения профилей большого и малого зеркал, которые в конечном счете будут иметь форму ломанных линий, касательных к искомому профилю.

Что касается выбора начальных точек на зеркалах, то этот выбор, очевидно, должен производиться, исходя из требуемых габаритов антенны (например, из необходимого осевого размера или диаметра). В случае осесимметричных антенн, если задан осевой размер, первые касательные обычно выбираются на оси перпендикулярно к ней, а затем все построение ведется так, как показано выше.

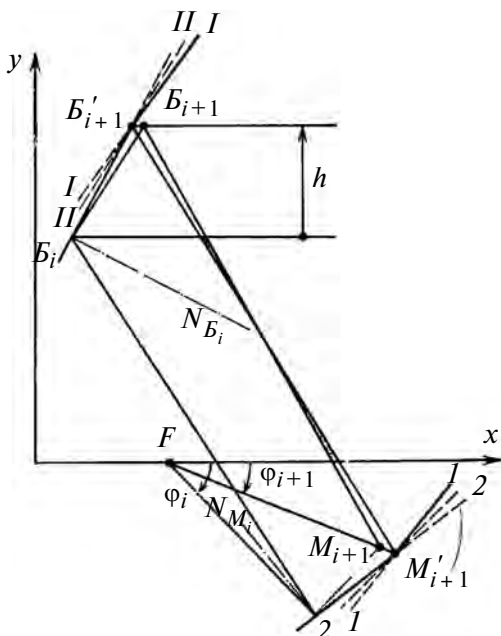


Рис. 327

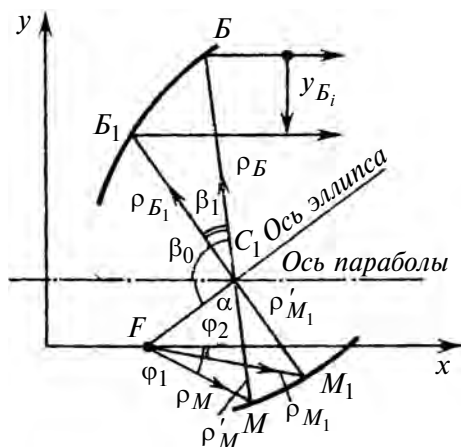


Рис. 328

Метод касательных является самым простым и оперативным методом, но он обладает существенным недостатком — низкой точностью воспроизведения профилей зеркал. Значительное увеличение точности построения дает метод усредненных касательных. Рассмотрим этот метод.

Пусть на рис. 327  $M_i M'_{i+1}$  — касательная, построенная по нормали к биссектрисе  $N_{M_i} M_i$  обычным методом касательных; соответствующая касательная к большому зеркалу есть  $B_i B'_{i+1}$ . Луч  $M'_{i+1} B'_{i+1}$  также построен методом касательных и ему соответствуют касательные  $I-I$  и  $I'-I'$  к малому и большому зеркалам соответственно.

Согласно методу усредненных касательных угол между касательной  $M_i M'_{i+1}$  и  $I-I$  делится пополам и параллельно биссектрисе  $2-2$  этого угла проводится линия  $M_i M_{i+1}$  до пересечения с лучом  $F M'_{i+1}$ . Эта линия и является усредненной касательной к зеркалу в точке  $M_i$ . Аналогично строится линия  $B_i B_{i+1}$ .

Более точное воспроизведение необходимого профиля зеркала может быть получено, если искомую интегральную кривую аппроксимировать набором кривых второго порядка. В этом случае профиль большого зеркала будет представлять собой огибающую семейства парабол, а профиль малого — огибающую эллипсов или гипербол. Очевидно, соответствующие параболы и эллипсы (гиперболы) будут иметь общие фокусные точки. Параметры участков аппроксимации можно рассчитать из энергетических соображений. На основании рис. 328 можно написать следующие соотношения:

$$\frac{\rho_B}{\rho_{B_1}} = \frac{1 + \cos(\beta_0 + \beta_1)}{1 + \cos\beta_0},$$

$$\rho_B = \sin\beta_0 - \rho_{B_1} \sin(\beta_0 - \beta_1) = y_B(\varphi),$$

$$\rho_C + \rho_B = C, \quad \rho_C = \frac{\rho_\varepsilon}{1 - e \cos\alpha},$$

$$\rho_{C_1} = \frac{\rho_\varepsilon}{1 - e \cos(\alpha + \beta_1)},$$

$$\rho_M - \rho_C = \frac{2\rho_\varepsilon}{1 - e^2},$$

$$\rho_{M_1} + \rho_{C_1} = \rho_M + \rho_C,$$

$$\rho_M = \frac{\rho_\varepsilon}{1 - e \cos(\alpha + \beta_0 - \varphi_1)},$$

$$\rho_{M_1} = \frac{\rho_\varepsilon}{1 - e \cos(\alpha + \beta_0 - \varphi_2)}.$$

Здесь  $e$  — эксцентриситет эллипса,  $\beta_1$  — угол между радиусами-векторами крайних точек уча-

стка параболы  $\rho_B$  и  $\rho_{B_1}$ ,  $\alpha$  — угол между полярной осью эллипса и  $\rho_C$ ,  $\rho_M$  и  $\rho_{M_1}$  — радиусы-векторы участка эллипса,  $\rho_\Sigma$  — фокальный параметр элементарного эллипса, фокусы которого располагаются в точках  $F$  и  $C_1$ . В фокусе  $F$  располагается облучатель, а точка  $CC_1$  является также фокусом элементарного параболоида. Ось элементарного параболоида горизонтальна. Очевидно, положение точки  $F$  является постоянным, в то время как положение точки  $C_1$  различно для разных участков антенны, поэтому эта точка далее обозначена как  $C_i$ .

Для решения системы этих уравнений целесообразно вначале вывести зависимость  $y_{B_i} = f(\rho_{B_i})$ . Эта зависимость позволит выбрать  $\rho_B$  таким, чтобы выполнялось соотношение  $y_{B_i} = f(\rho_i)$ . Таким образом определяется  $i$ -й фокус участка параболы и сопряженного с ним участка эллипса и гиперболы. Определив фокус, можно рассчитать следующие точки большого и малого зеркал. Зависимость между  $y_{B_i}$  и  $\rho_{B_i}$  имеет следующий вид:

$$y_{B_{i+1}} = y_{B_i} - \rho_{B_i} \sin \alpha_i \pm \sqrt{2\rho_{B_i}(1 - \cos \alpha_i) \left[ x_{B_{i+1}} - x_{B_i} + \frac{\rho_{B_i}(1 + \cos \alpha_i)}{2} \right]}.$$

Абсцисса  $x_{B_{i+1}}$  точки большого зеркала  $B_{i+1}$  определяется следующим образом:

$$x_{B_{i+1}} = x_{C_i} + \frac{\rho_{B_i}(1 - \cos \alpha_i)}{1 - \cos \alpha_{i+1}} \cos \alpha_{i+1}.$$

Координаты  $x_{M_{i+1}}$  и  $y_{M_{i+1}}$  малого зеркала таковы:

$$x_{M_{i+1}} = \rho_{M_{i+1}} \cos \varphi_{i+1} + x_F,$$

$$y_{M_{i+1}} = \rho_{M_{i+1}} \sin \varphi_{i+1} + y_F,$$

где

$$\rho_{M_{i+1}} = \frac{a^2 - C^2}{a - C \cos \beta_i},$$

$$a = \frac{1}{2} \sqrt{(x_{M_i} - x_{C_i})^2 + (y_{M_i} - y_{C_i})^2} + \sqrt{(x_{M_i} + x_F)^2 + (y_{M_i} - y_F)^2},$$

$y_F, x_F$  — координаты фазового центра облучателя,  $x_{C_i}, y_{C_i}$  — координаты текущего фокуса параболического участка.

Задаваясь изменением координаты точки  $C_1$  вдоль прямой  $M_i B_i$ , можно найти зависимость

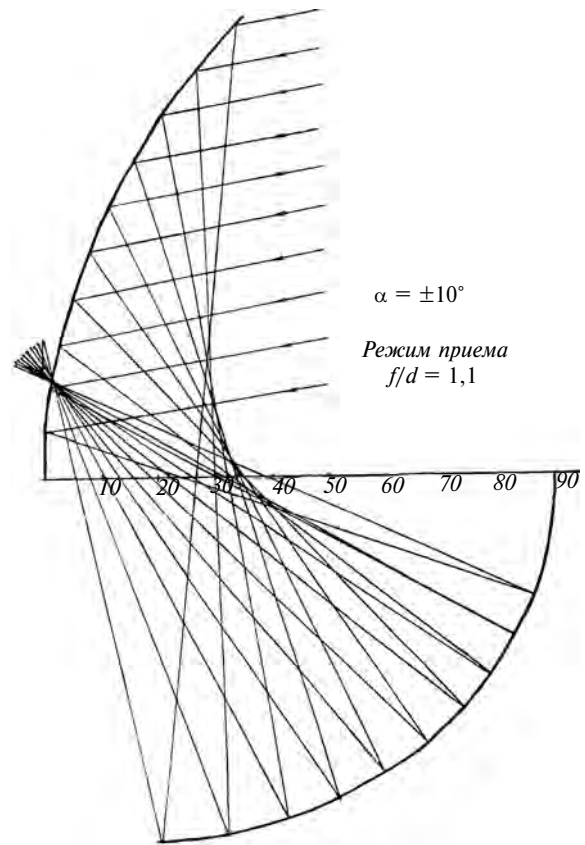


Рис. 329

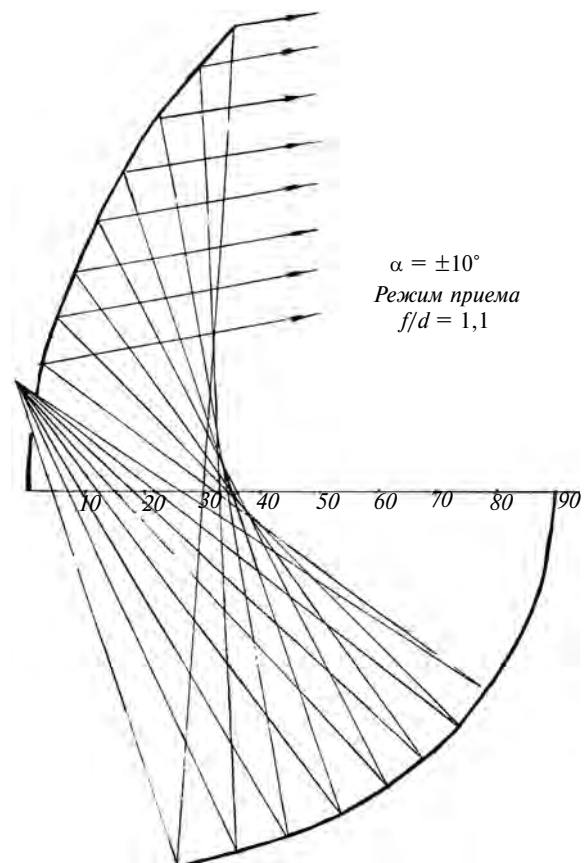


Рис. 330

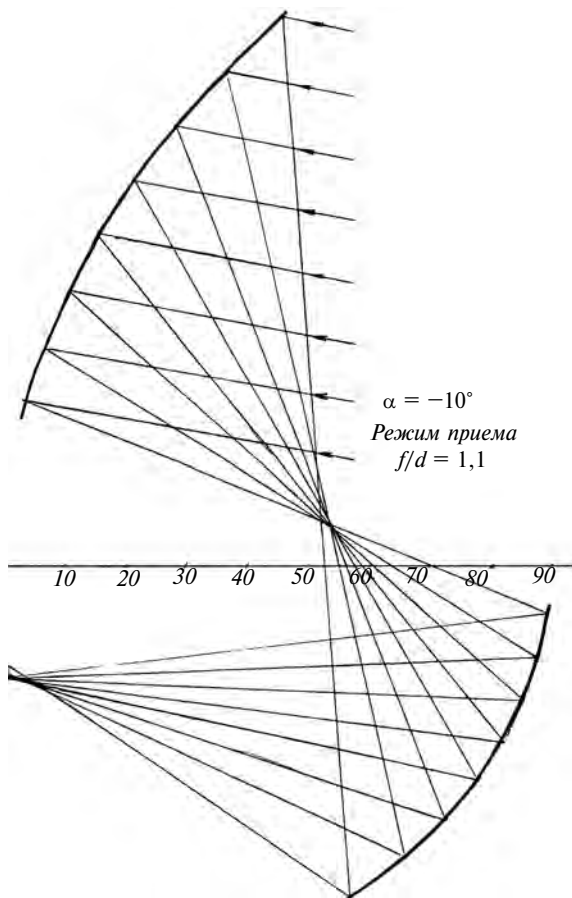


Рис. 331

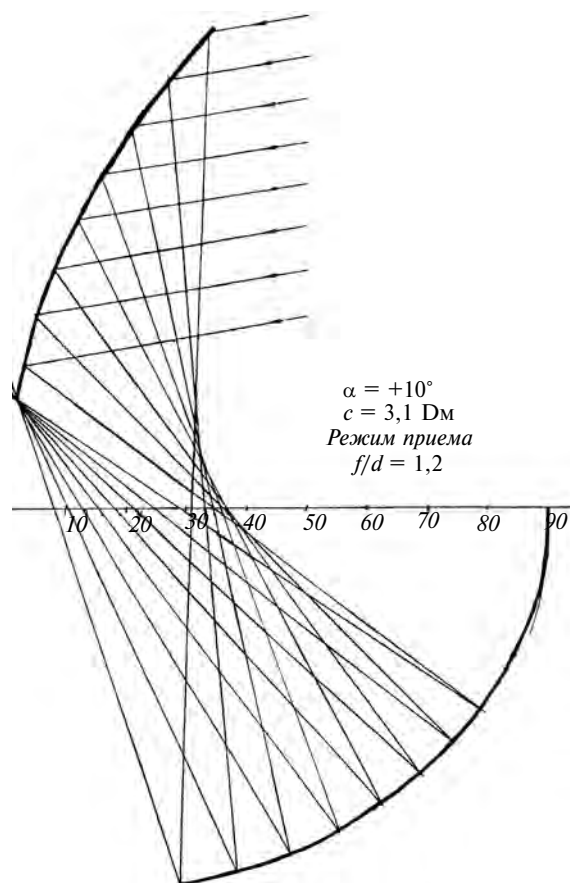


Рис. 333

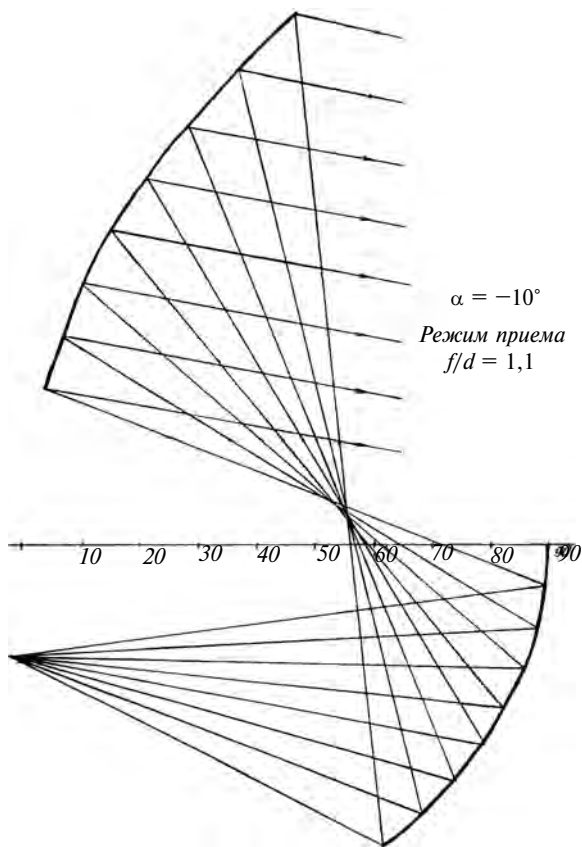


Рис. 332

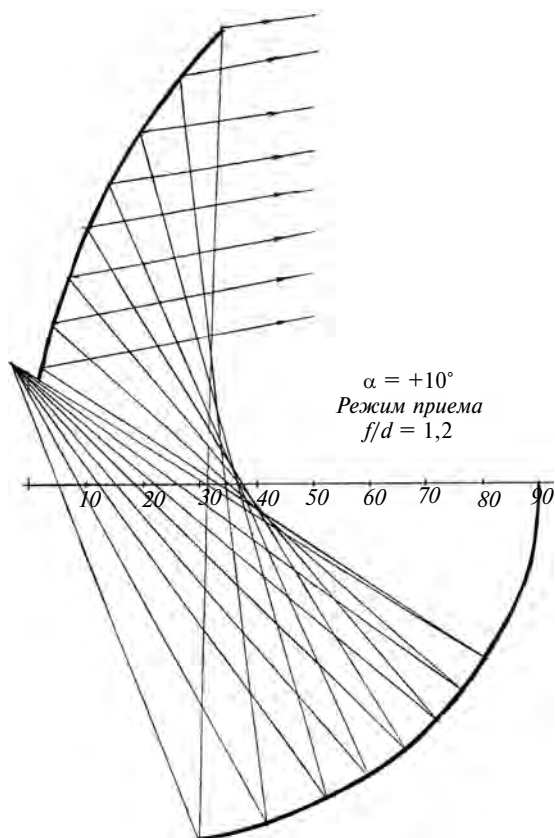


Рис. 334

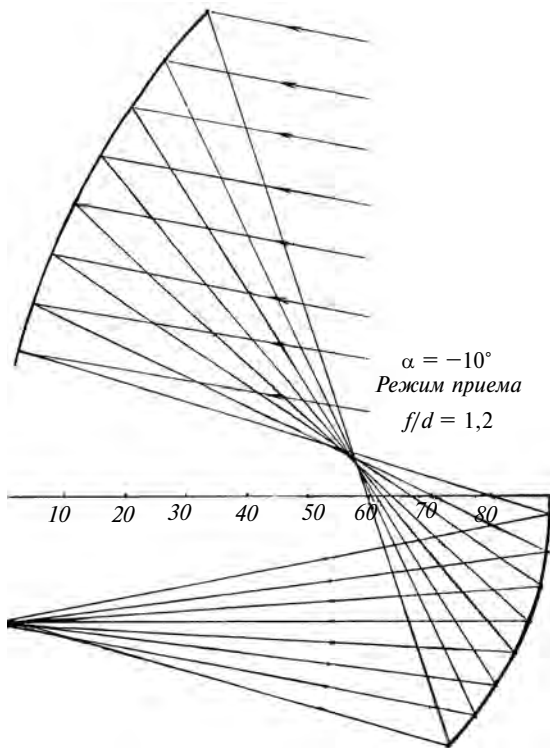


Рис. 335

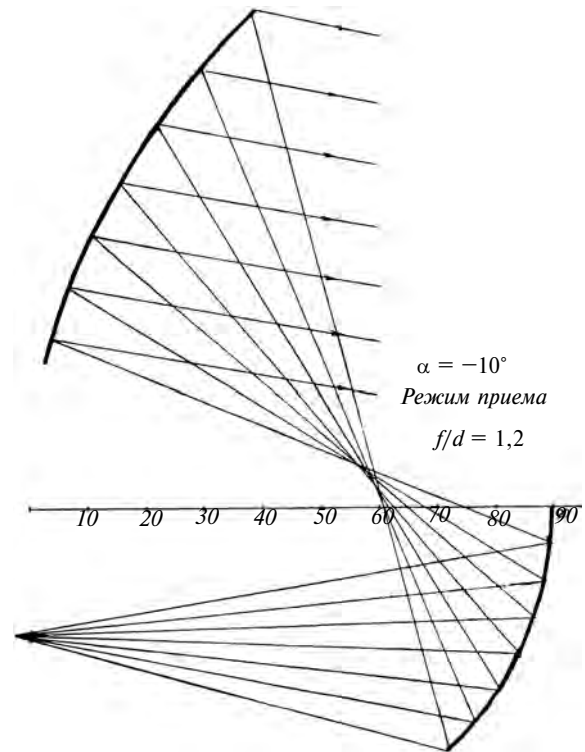


Рис. 336

$y_{B_i} = f(\rho_{B_i})$ . При этом выбирается такое значение  $\rho_{B_i}$ , которое определяет  $y_{B_{i+1}}$ , соответствующее  $\varphi_{i+1}$ . Определив  $\rho_{B_i}$ , рассчитываем соответствующие участки большого и малого зеркал, затем переходим к определению частного фокуса для следующего участка и т. д.

Рассмотренный метод позволяет с высокой степенью точности произвести расчет двухзеркальной системы.

На серии рисунков 329—336 представлены результаты расчета хода лучей зафокальных неопланатов в режимах приема и передачи при сканировании на  $\pm 10^\circ$ . Видно, что при указанных на схемах геометрических параметрах искажения структуры лучей имеют вполне умеренный характер, а такая aberrация как кома практически вообще отсутствует.

получен в раскрыве; этому пучку лучей может соответствовать либо пучок II, либо пучок III (пучок II и соответствующая характеристическая кривая A — осесимметричная антенна, пучок III и характеристическая кривая B — неосесимметричная антенна).

Уравнение кривой B можно записать в виде

$$f_{\text{неос}}(\varphi) = f_{\text{ос}} \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $f_{\text{ос}}(\varphi)$  — радиус-вектор характеристической кривой осесимметричной антенны,  $f_{\text{неос}}(\varphi)$  — радиус-вектор характеристической кривой неосесимметричной антенны с таким же амплитудным распределением в раскрыве.

На рис. 338 показан ход лучей в неосесимметричной антенне типа "раковина". Для расчета профилей главного (I) и вспомогательного (II) зеркал запишем следующую систему уравнений, полученную на основании рис. 338 в пред-

## НЕОПЛАНАТ "РАКОВИНА"

В теории неопланатов весьма перспективно использование зависимости параметров антенны от формы характеристической кривой, которая в осесимметричных системах имеет форму окружности.

Рассмотрим рис. 337, помощью которого можно пояснить переход от осесимметричной к неосесимметричной антенне. Здесь I — пучок коллимированных лучей, который должен быть

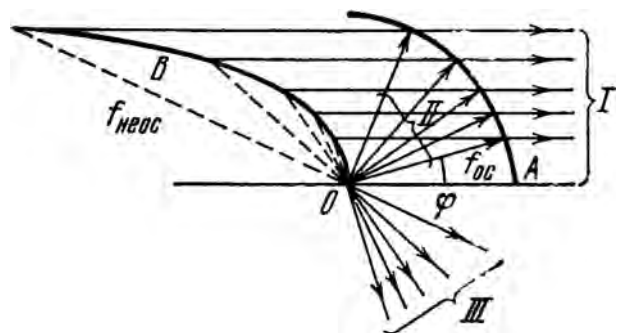


Рис. 337

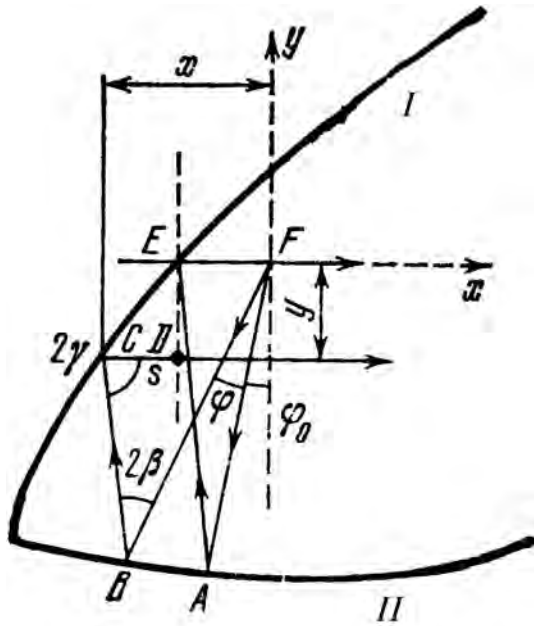


Рис. 338

положении, что плоский фронт волны проходит через точку  $E$ , а его след соответствует линии  $DE$  (на рисунке  $FB = r$ ,  $BC = l$ ,  $CD = s$ ,  $FA = r_0$ ,  $AE = l_0$ ,  $EF = s_0$ ):

$$r + l + s = r_0 + l_0, \quad r \sin(\varphi + \varphi_0) + l \cos 2\gamma = s + s_0,$$

$$r \cos(\varphi + \varphi_0) - l \sin 2\gamma = y, \quad \gamma = \frac{90^\circ + \varphi_0 + \varphi}{2} - \beta,$$

$$\frac{1}{r} \frac{dr}{d\varphi} = \operatorname{tg} \beta, \quad y = f \sin(\varphi_0 + \varphi)$$

при  $\varphi = 0$ ,  $y = f \sin \varphi_0$

Пятое уравнение этой системы является уравнением нормали к вспомогательному зеркалу, а шестое — уравнением апланатизма ( $x$  и  $y$  определяют координаты точки  $C$  на главном зеркале). Преобразуя, как и ранее, полученную систему уравнений, получим дифференциальное уравнение профиля вспомогательного зеркала:

$$\frac{dr}{d\varphi} = \frac{r\{r_0 + l_0 - r[1 + \sin(\varphi + \varphi_0)]A - r \cos(\varphi + \varphi_0) + y\}}{r_0 + l_0 + [r \cos(\varphi + \varphi_0) - y]A - r[1 + \sin(\varphi + \varphi_0)]}, \quad (85)$$

$$\text{где } A = \frac{\cos(\varphi + \varphi_0)}{1 - \sin(\varphi + \varphi_0)}.$$

Уравнение профиля главного зеркала в параметрической форме в прямоугольной системе координат имеет вид

$$\begin{cases} x = r \sin(\varphi + \varphi_0) + \frac{r_0 + l_0 - r[1 + \sin(\varphi + \varphi_0)]}{1 + \cos 2\gamma} \cos 2\gamma, \\ y = f \sin(\varphi + \varphi_0). \end{cases} \quad (86)$$

В формулах (85) и (86) присутствуют независимые параметры  $f$ ,  $r_0$ ,  $l_0$ ,  $s_0$  и  $\varphi_0$ , которые определяют форму зеркал антенны и ее сканирующие характеристики. Эти параметры определяются в каждом конкретном случае в зависимости от требуемого сектора сканирования, ширины диаграммы направленности, уровня боковых лепестков и т. д. Если антенна используется для сканирования, то наиболее важной является проблема обеспечения минимальных искажений диаграммы направленности. Для этой цели можно воспользоваться следующими методами анализа искажений в режиме приема, а затем передачи.

Исследуем искажения, возникающие в области фокального пятна в неосесимметричных антеннах при сканировании. Для этого рассмотрим рис. 339, на котором представлена схема антенны. На этом рисунке  $ABCM$  — осевой луч падающего на главное зеркало под углом  $\alpha$  параллельного пучка лучей,  $GHLK$  и  $DEFN$  — два симметричных луча, падающих на главное зеркало на конечном расстоянии  $\pm y$  от оси  $OB$ . До падения на главное зеркало все три луча образуют с осью  $OB$  угол  $\alpha$ . В фокальной области они в общем случае пересекаются не в одной точке. Лучи, падающие на главное зеркало в области точки  $B$ , образуют после отражения от вспомогательного зеркала параосиальный фокус. Термин "параосиальный" по аналогии с оптикой означает фокус лучей, расположенных около оси системы, т. е. в ее средней части, и пересекающихся с осью.

Симметричные относительно центра раскрыва лучи, удаленные от него, образуют частные фокусы в точках их пересечения с некоторой линией, которую можно условно считать осью антенны. Такой осью на рис. 339 будем считать луч  $AB$ , падающий на антенну в центре раскрыва ( $y = 0$ ). Тогда точка  $K$  будет фокусом луча  $GHLK$ ,

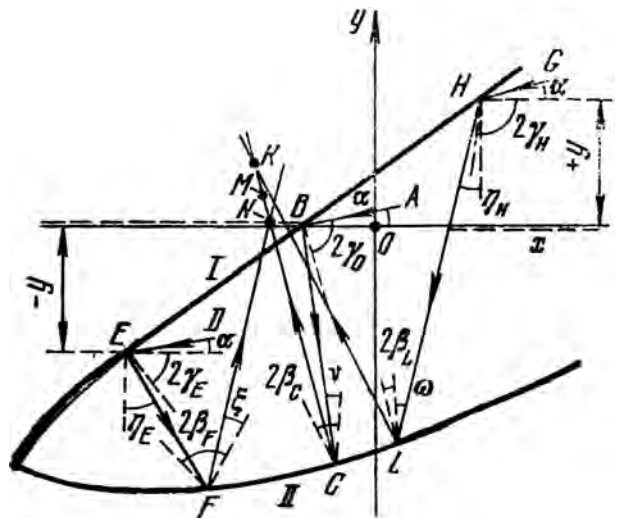


Рис. 339



а точка  $N$  — фокусом луча  $DEFN$ . Фокусы  $K$  и  $N$  являются, очевидно, частными фокусами, так как все остальные лучи будут иметь фокусы в других точках. Расстояния этих частных фокусов от параксиального фокуса будут характеризовать искажения, имеющие место в антенне при сканировании. Расстояния от частных фокусов до параксиального фокуса и друг от друга определяют соответственно сферическую aberrацию и кому для данных участков антенны ( $\pm y$ ).

Пусть точка  $M$  — параксиальный фокус антенны, соответствующий случаю  $\pm y \rightarrow 0$ ; тогда зональная кома  $F_3$  и сферическая aberrация  $B$  для верхней ( $y > 0$ ) и нижней ( $y < 0$ ) частей антенны запишутся в виде

$$F_3 = \sqrt{(x_N - x_K)^2 + (y_K - y_N)^2},$$

$$B_{\text{верхн. части}} = \sqrt{(x_M - x_K)^2 + (y_K - y_M)^2},$$

$$B_{\text{нижн. части}} = \sqrt{(x_M - x_N)^2 + (y_N - y_M)^2}.$$

Для определения входящих сюда координат частных фокусов найдем параметры лучей в точках их отражений от зеркал (координаты точек отражения и направления отраженных лучей).

Координаты точки  $F$ , в которую падает луч  $DEFN$ , найдем из соотношения

$$y_E = r_F \cos(\varphi_F + \varphi_0) - [x_E - r_F \sin(\varphi_F + \varphi_0)] \operatorname{ctg} \eta_E, \quad (87)$$

где

$$y_E = f \sin \varphi_E, \quad \eta_E = 90^\circ - 2\gamma_E - \alpha,$$

$$\operatorname{tg} \gamma_E = \frac{-y + r \cos(\varphi_E + \varphi_0)}{A - r[1 + \sin(\varphi_E + \varphi_0)]}.$$

Здесь  $r_F$ ,  $x_E$  определяются уравнениями (85) и первым уравнением (86) соответственно. Уравнение (87) может быть решено только численным методом. Для определения координат точки  $L$  луча  $GHLK$  составим аналогичное соотношение:

$$y_H = [x_H - r_L \sin(\varphi_L - \varphi_0)] \operatorname{ctg} \eta_H - r_L \cos(\varphi_L - \varphi_0),$$

где

$$y_H = f(\varphi_H) \sin \varphi_H, \quad \eta_H = 2\gamma_H - 90^\circ + \alpha,$$

$$\operatorname{tg} \gamma_H = \frac{y + r \cos(\varphi_H - \varphi_0)}{A - r[1 - \sin(\varphi_H - \varphi_0)]}.$$

Координаты точки  $C$  луча  $ABCM$  найдем из соотношения

$$[r_C \sin(\varphi_C + \varphi) - S_0] \operatorname{tg}(2\gamma_0 + \alpha - 90^\circ) = r_C \cos(\varphi_C + \varphi_0),$$

где  $S_0 = AB$ .

Входящее сюда значение  $r_C$  может быть получено из уравнения (85). Найдем, далее, координаты частных фокусов  $N$  и  $K$ , решая две системы уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{x_N - x_F}{\cos[90^\circ - (\varphi + \varphi_0) + \xi]} &= \frac{y_N - y_F}{\cos(\varphi + \varphi_0 - \xi)}, \\ \frac{x_N - x_C}{\cos[90^\circ - 2\beta + \nu + (\varphi + \varphi_0) + \xi]} &= \\ &= \frac{y_N - y_C}{\cos(2\beta - \nu - \varphi_0 - \varphi)}, \end{aligned} \right. \quad (88, a)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{x_K - x_L}{\cos[90^\circ - \omega - (\varphi - \varphi_0)]} &= \frac{y_K - y_L}{\cos(\omega - \varphi - \varphi_0)}, \\ \frac{x_K - x_C}{\cos[90^\circ - 2\beta + \nu + (\varphi + \varphi_0)]} &= \\ &= \frac{y_K - y_C}{\cos(2\beta - \nu - (\varphi_0 + \varphi))}, \end{aligned} \right. \quad (88, б)$$

где  $\omega = 2\gamma - 90^\circ + 2\beta_L + \alpha - (\varphi - \varphi_0)$ ,

$$\nu = 90^\circ - 2\gamma_0 + \alpha + (\varphi + \varphi_0),$$

$$\xi = 2\gamma - 90^\circ + 2\beta_F + \alpha - (\varphi - \varphi_0).$$

Определив координаты частных фокусов, можно найти значения комы и сферической aberrации для данного отклонения диаграммы направленности. Подбирая параметры антенны, добиваемся того, чтобы кома и сферическая aberrация были минимальны.

Найдем фазовые искажения в плоскости сканирования, когда источник из фокуса, обозначенного на рис. 340, *a* буквой  $O$ , вынесен в некоторую точку  $D$  с координатами  $m$  и  $A$ , т. е. рассмотрим работу антенны в режиме передачи. В качестве эталона при расчете фазовой ошибки возьмем длину луча  $DCBH$ , который отражается от точки  $B$  главного зеркала.

Параметры этого луча найдем из следующих уравнений (рис. 340, б):

$$\operatorname{tg} \nu = \frac{r_C \sin(\varphi_C + \varphi_0) - m}{r_C \cos(\varphi_C + \varphi_0) - A},$$

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{S_0 - r_C \sin(\varphi_C + \varphi_0)}{r_C \cos(\varphi_C + \varphi_0)},$$

$$\lambda = 2\beta_C + \nu - 2(\varphi_C + \varphi_0),$$

где

$$\frac{1}{r_C} \frac{dr_C}{d\varphi_C} = \operatorname{tg} \beta_C, \quad S_0 = BO.$$

Радиус-вектор  $r_C$  точки  $C$  определяется уравнением (85). Угол, под которым выходит осевой луч  $DCBH$ , равен  $\Omega = 90^\circ - \lambda - 2\gamma_0$ .

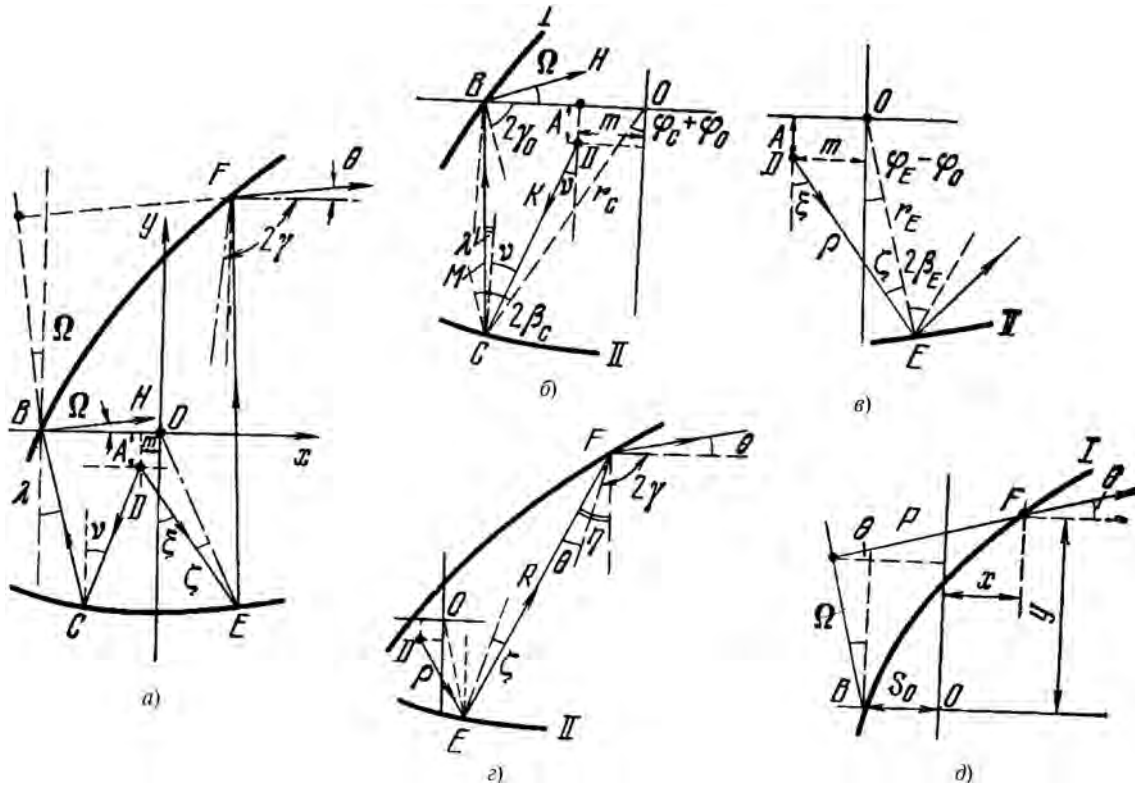


Рис. 340

Длину эталонного луча обозначим  $L_0$ :

$$L_0 = M + K = \frac{r_C \sin(\varphi_C + \varphi_0) - m}{\sin \nu} + \frac{r_C \cos(\varphi_C + \varphi_0)}{\cos \lambda}. \quad (89)$$

Рассмотрим теперь произвольный луч, который отражается от вспомогательного зеркала в точке  $E$  и образует с вертикалью (начало отсчета) некоторый заданный угол  $\xi$ . Тогда для этой точки справедливы соотношения (рис. 340, в)

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{r_E \sin(\varphi_E - \varphi_0) + m}{r_E \cos(\varphi_E - \varphi_0) - A},$$

$$\zeta = \xi - (\varphi_E - \varphi_0).$$

Для точки  $F$  запишем аналогично (рис. 340, в, з)

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{x_F + m - DE \sin \xi}{y_F + A + DE \cos \xi},$$

$$DE = \frac{r_E \sin(\varphi_E - \varphi_0) + m}{\sin \xi},$$

$$\eta = 2\beta_E - 2(\varphi_E - \varphi_0) + \xi.$$

Угол, под которым отражается произвольный луч от главного зеркала, равен  $\theta = 90^\circ + \eta - 2\gamma$ ,

$$\text{где } \operatorname{tg} \gamma = \frac{y + r \cos(\varphi - \varphi_0)}{A - r[1 - \sin(\varphi - \varphi_0)]}.$$

Для расчета волновых искажений необходимо определять расстояние вдоль произвольного луча до плоскости, перпендикулярной осевому лучу и проходящей через точку  $B$  (рис. 340, а, д). Полная длина этого луча равна

$$L = \rho + R - P = \frac{r \cos(\varphi - \varphi_0) - A}{\cos \xi} + \frac{y + A - DE \cos \xi}{\sin \eta} - \frac{x + S_0 + y \operatorname{tg} \Omega}{\cos \theta + \sin \theta \operatorname{tg} \Omega}. \quad (90)$$

Здесь первое и второе слагаемые показаны на рис. 340, в, з, третье слагаемое — на рис. 340, б.

Разность длин лучей (89) и (90), взятая по всему раскрытию, определяет волновые искажения в антенне.

Расчет астигматизма несимметричных апланатических антенн содержит еще большие трудности, чем расчет астигматизма осесимметричных антенн ввиду сложности формы поверхностей зеркал. Однако сложность формы поверхностей имеет и свои преимущества: в несимметричных антеннах имеется некоторая принципиальная возможность управления астигматизмом за счет соответствующего выбора формы сечений антенны, не лежащих в плоскости симметрии.

Если несимметричная антенна предназначена для сканирования в одной плоскости, а именно в плоскости симметрии, то это сече-

ние логично рассчитывать как апланатическое, а остальные сечения — из условия максимального исправления астигматизма в заданном секторе сканирования.

Рассмотрим расчет астигматизма неосесимметричной антенны, профиль которой в плоскости симметрии описывается уравнениями (85) и (86). При этом необходимо найти расстояние между меридиональным фокусом  $M$  и точкой  $D$  пересечения сагиттальных лучей  $ABCD$  и  $EFGD$  с плоскостью симметрии антенны (рис. 341).

Для расчета формы внемеридиональных сечений рассматриваемой антенны можно воспользоваться, например, методом аппроксимаций поверхностями второго порядка. А именно, можно считать, что меридиональное сечение главного

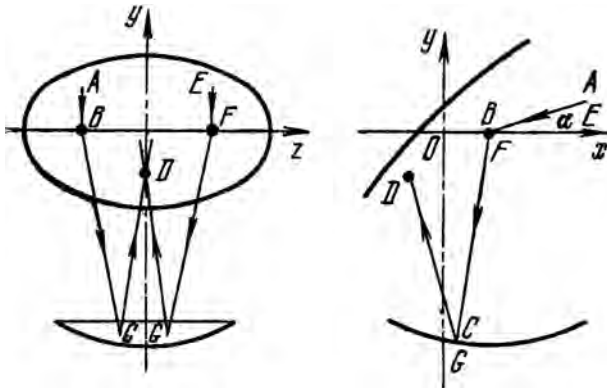


Рис. 341

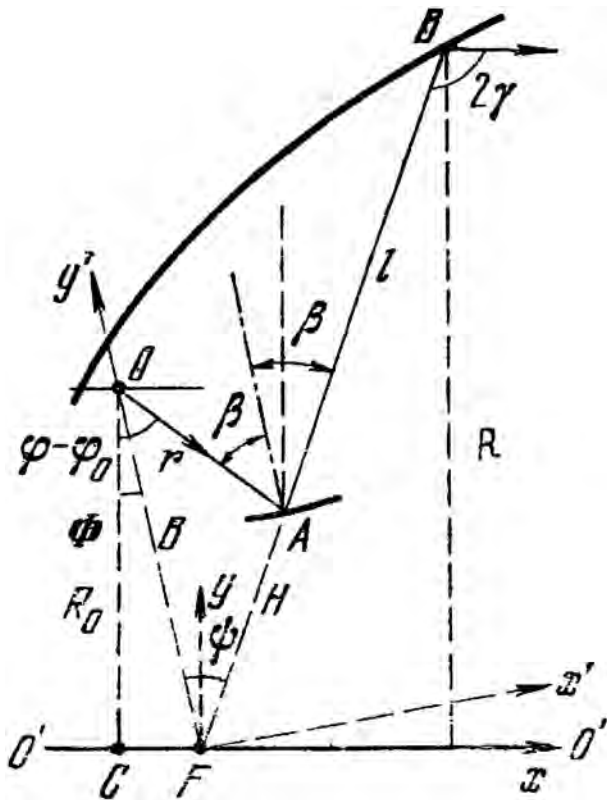


Рис. 342

зеркала антенны есть огибающая системы параболоидов, а меридиональное сечение вспомогательного зеркала — огибающая системы гиперболоидов. Например, на рис. 342 точка  $F$  есть один из фокусов гиперболоида, касательного к вспомогательному зеркалу в точке  $A$ . Эта точка является также фокусом параболоида, касательного к главному зеркалу в точке  $B$ .

Вторым фокусом гиперболоида является точка  $O$ , в которой располагается фокус всей антенны.

Фокус  $F$ , очевидно, должен лежать на продолжении луча  $AB$ ; его положение зададим расстоянием  $R_0$ . Линия  $O'O'$  является осью параболоида и расположена горизонтально. Расстояние от фокуса  $F$  до точки  $A$  на вспомогательном зеркале обозначим буквой  $H$ . Показанные на рис. 342 отрезки  $r$  и  $l$ , а также углы  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$ ,  $\varphi_0$  связаны соотношениями (85) и (86).

Радиус-вектор параболического сечения запишется в виде

$$\rho = l + H = \frac{R_0 - r \cos(\varphi + \varphi_0)}{\cos(2\beta - \varphi - \varphi_0)} + l.$$

Положение фокуса  $F$  определяется расстоянием  $B$  и углом  $\Phi$ :

$$B = \sqrt{R_0^2 + [r \sin(\varphi + \varphi_0) - H \sin(2\beta - \varphi - \varphi_0)]^2},$$

$$\Phi = \arccos\left(\cos \frac{R_0}{B}\right).$$

Уравнение частной параболической поверхности можно представить как

$$y^2 + z^2 = 2x(l + H)[1 - \cos(90^\circ + \Phi - \psi)],$$

где  $\psi = 2\beta - \varphi - \varphi_0 + \Phi$ . Уравнение частной гиперболической поверхности можно получить в следующем виде:

$$\frac{1}{a^2} \left( H \cos \psi - \frac{B}{2} \right)^2 - \frac{1}{b^2} (H \sin \psi)^2 = 1,$$

где  $a$  и  $b$  — параметры гиперболической поверхности.

Единичный вектор, направленный вдоль луча, отраженного от вспомогательного зеркала, запишем в виде

$$\mathbf{s}_2 = \mathbf{s}_1 - 2(\mathbf{s}_1 \mathbf{n}_2) \mathbf{n}_2.$$

Составляющие нормали  $\mathbf{n}_2$  к вспомогательному зеркалу могут быть найдены из соотношений

$$n_x = \frac{1}{\Delta} \frac{\partial F(x, y)}{\partial x}, \quad n_y = -\frac{1}{\Delta} \frac{\partial F(x, y)}{\partial y}, \quad n_z = -\frac{1}{\Delta},$$

$$\Delta = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial F(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F(x, y)}{\partial y}\right)^2},$$

где функция  $F(x, y)$  есть уравнение поверхности вспомогательного зеркала.

Уравнение луча, отраженного от вспомогательного (малого) зеркала, будет иметь вид

$$\frac{x - x_M}{s_{2x}} - \frac{y - y_M}{s_{2y}} - \frac{z - z_M}{s_{2z}}, \quad (91)$$

где  $x_M, y_M, z_M$  — координаты точки отражения от этого зеркала.

Очевидно, что фокусом луча, который не лежит в плоскости симметрии, т. е. сагиттальным фокусом, будет точка пересечения его с плоскостью симметрии. Для определения координат сагиттального фокуса необходимо решить совместно уравнение (91) и уравнение меридиональной плоскости  $z = 0$ .

Среднеквадратичное значение полученных координат для исследуемой группы лучей даст положение сагиттального фокуса антенны.

Рассмотрим теперь некоторые результаты анализа искажений, возникающих в плоскости симметрии при сканировании в этой плоскости.

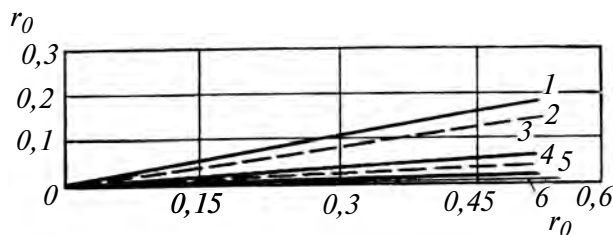


Рис. 343

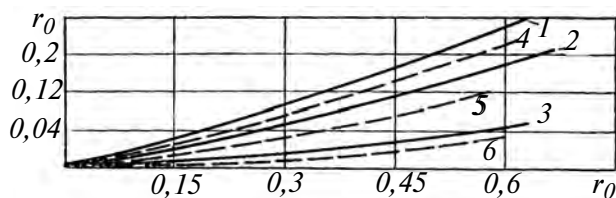


Рис. 344

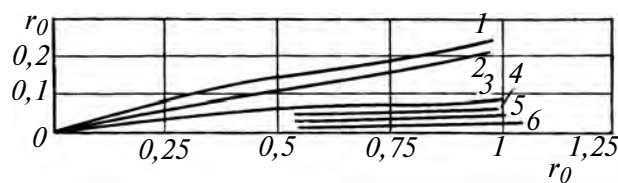


Рис. 345

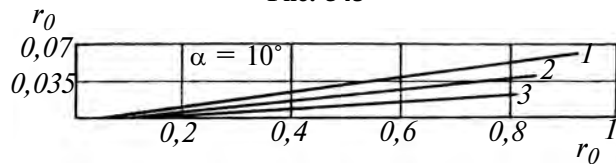


Рис. 346

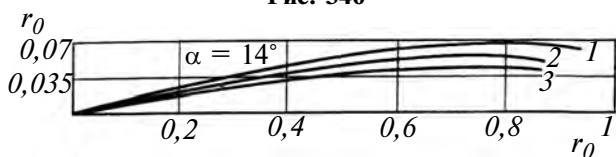


Рис. 347

Для того чтобы результаты исследования были более универсальными, размеры антенны будем относить к одному и тому же размеру, а именно к расстоянию  $r_0 = FA$  (см. рис. 338, б). Это расстояние аналогично осевому размеру  $d$  в осесимметричных антеннах.

На рис. 343 представлены aberrации двух неопланатов.

В первой антенне характеристическая кривая определялась радиусом кривизны  $R = 0,52r_0$ , а во второй  $R = 0,76r_0$ . В обоих случаях угол отклонения падающего фронта составлял  $20^\circ$  от вертикали. На рис. 343 кривые 1 и 4 представляют собой зависимость комы от координаты раскрытия для первой и второй антенн соответственно. Кривые 2 и 3 представляют собой зависимость сферической aberrации от координаты раскрытия для первой антенны, а кривые 5 и 6 имеют аналогичные значения для второй антенны. По горизонтали отложено значение координаты раскрытия, отнесенной к  $r_0$ , а по вертикали — значения комы и сферической aberrации также в долях  $r_0$ .

Из рис. 343 видно, что сферическая aberrация и кома на рассматриваемом участке раскрытия антенны в общем увеличиваются пропорционально радиусу раскрытия, причем в обоих случаях сферическая aberrация в нижней части антенны (кривые 3 и 6) меньше, чем в верхней (кривые 2 и 5). Таким образом, изменение кривизны характеристической кривой ведет к изменению величины aberrаций антенны.

На величину aberrаций существенное влияние оказывают также основные относительные размеры неосесимметричной антенны ( $s_0/r_0, l_0/r_0$ ) и угол  $\varphi_0$ , определяющий степень ее несимметрии. На рис. 344 графики 1, 2 и 3 имеют тот же смысл, что и на рис. 343 для антенны, у которой  $s_0 = 0,2r_0$ , а графики 4, 5 и 6 — для антенны с  $s_0 = 0,1r_0$ . Из рис. 344 видно, что отрезок  $s_0$  влияет на сканирующие свойства так же, как вершинный отрезок  $M$  в осесимметричных антеннах.

Большой интерес представляет анализ влияния формы характеристической кривой на сканирующие свойства, поэтому был исследован ряд антенн с различными характеристическими кривыми. Так, на рис. 345 представлены результаты исследования двух антенн: у первой (кривые 1, 2, 3) характеристическая кривая — симметричная тангенсоида, а у второй (кривые 4, 5, 6) верхняя часть — тангенсоида, а нижняя — окружность. Как видно в последнем случае aberrации меньше.

Особенно большие возможности открывает использование антенн с эллиптической формой характеристических кривых с разными параметрами; на рис. 346 и 347 показаны aberrации этих типов антенн. Видно, что aberrации существенно меньше, чем во всех предыдущих случаях.

## ДВУХЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ С ТРАНСФОРМАЦИЕЙ РАСКРЫВОВ — ТР-АНТЕННЫ

В ряде случаев могут быть полезны антенны, облучающее устройство которых создает параллельный пучок лучей с небольшим размером полученного сечения. Этот пучок лучей после отражения от вспомогательного и главного зеркала преобразуется также в параллельный пучок, но с гораздо большим размером поперечного сечения. Для реализации этого процесса используются конфокальные параболоиды в предфокальной и зафокальной схемах, осесимметричные варианты которых показаны на рис. 124, 125.

Были рассмотрены искажения, возникающие в антенне с трансформацией раскрывов при сканировании. На рис. 348, 349 показан ход лучей в двух вариантах, отличающихся отношением фокусных расстояний вспомогательного и главного зеркала ( $f/F$ ). На рис. 438 фронт *I* есть плоский фронт волны, падающей на главное зеркало *II*; после отражения от вспомогательного зеркала *III* формируется фронт *IV*, по форме которого можно судить об искажениях, имеющих место в антенне. Из сравнения фронтов *IV* на рис. 348 и рис. 349 видно, что при сканировании искажения больше в тех антеннах, которые характеризуются большей кривизной вспомогательного зеркала, т. е. меньшим отношением  $f/F$ .

ТР-антенна может быть выполнена как апланатическая. В этом случае зеркала уже не будут конфокальными параболами.

Особенностью предложенного апланата является то, что для его расчета не удастся непосредственно применять условие синусов в традиционной форме, поскольку облучатель не является точечным источником — он создает параллельный пучок лучей. Поэтому условие синусов необходимо преобразовать, учитывая, что оно в более общем понимании устанавливает определенное соотношение между лучами в раскрыве антенны и лучами источника. Для антенны, преобразующей параллельный пучок лучей источника также в параллельный пучок, но с другим поперечным сечением, условие синусов можно представить следующим образом:

$$Y = f \sin(\pi y/b),$$

где  $Y$  — ордината луча в раскрыве антенны,  $y$  — ордината луча облучателя,  $b$  — половина раскрыва облучателя. В этом случае расчет профилей зеркал должен вестись в следующей последова-

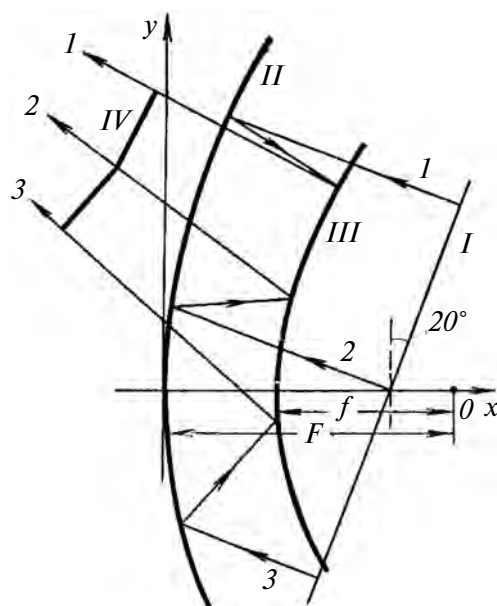


Рис. 348

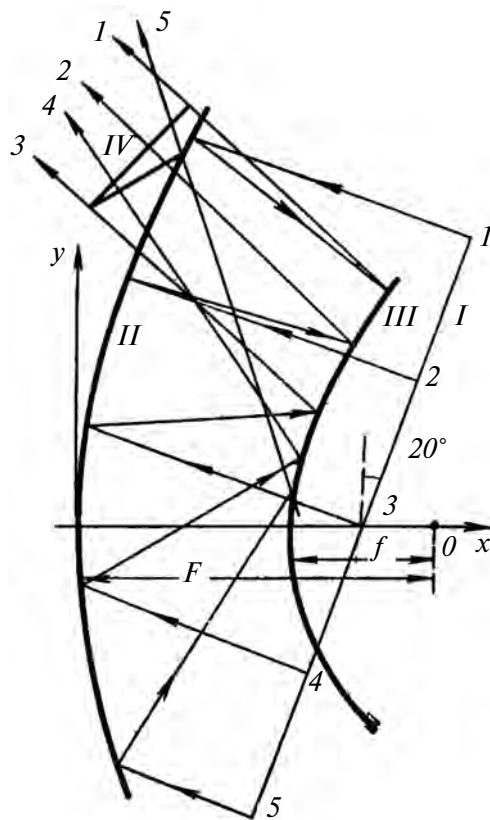


Рис. 349

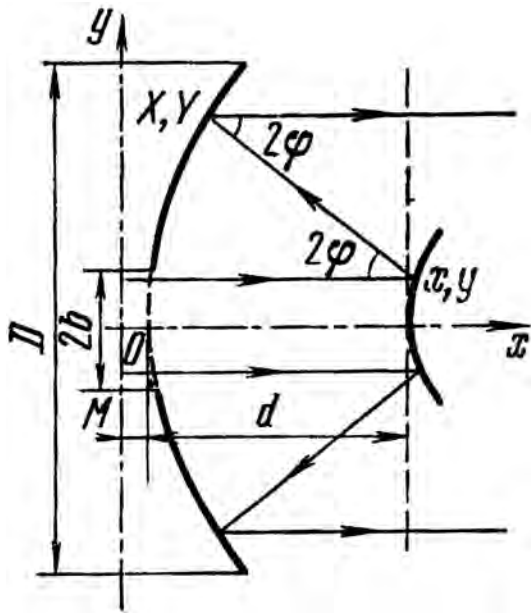


Рис. 350

тельности (рис. 350). Пусть фронт волны облучателя совпадает с плоскостью  $yOz$  и фронт волны на выходе из антенны также совпадает с этой плоскостью.

Тогда должно выполняться следующее равенство (при  $M = 0$ ):

$$x + \sqrt{(x-X)^2 + (Y-y)^2} - X = C = 2d,$$

где  $C$  — константа,  $x, y$  — координаты вспомогательного зеркала,  $X, Y$  — координаты главного зеркала,  $d$  — осевой размер антенны. В точках отражения выполняются равенства

$$\frac{dY}{dX} = \frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \varphi, \operatorname{tg} 2\varphi = \frac{Y-y}{-X+x}.$$

Из геометрии рис. 350 можно получить

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{2C(Y-y)}{C^2 - (Y-y)^2}, \operatorname{tg} \varphi = \frac{Y-y}{C}.$$

Отсюда дифференциальное уравнение главного зеркала можно записать следующим образом:

$$\frac{dY}{dX} = \frac{Y-y}{C}.$$

Решение дифференциальных уравнений зеркал получается в виде соотношений

$$x = d - \frac{y^2}{2C} + \frac{1}{C} \int_0^y Y dy,$$

$$X = \frac{Y^2}{2C} - \frac{1}{C} \int_0^Y y dy.$$

В процессе предварительного анализа для построения профилей ГР-антенны удобно воспользоваться методом касательных. Выше был рассмотрен метод касательных для случая точечного источника электромагнитных волн. Рассмотрим применение этого метода для случая, когда на вспомогательное зеркало падает параллельный пучок лучей (рис. 351).

Пусть имеется начальная точка  $M_0$  на малом зеркале и соответствующая точка  $B_0$  на большом зеркале, а также известна зависимость между ординатами лучей источника  $y$  и ординатами этих лучей в раскрыве  $Y$ . Для осесимметричных антенн при заданном осевом размере  $d$  первые касательные ( $M_0M_1$  и  $B_0B_1$ ) выбираются на оси антенны перпендикулярно к ней, и затем построение ведется следующим образом: проводим луч  $F_1M_1B_1A_1$ , а затем биссектрисы  $N_1B_1$  и  $K_1M_1$ ; перпендикуляры к этим биссектрисам являются касательными в точках  $B_1$  и  $M_1$ . Проведем теперь луч  $F_2M_2$  до пересечения с построенной касательной в точке  $M_2$ . На основании известной из условия апланатизма зависимости  $y-Y$  определяется приращение  $h$  ординаты главного зеркала и проводится горизонтальный луч до пересечения с найденной касательной в точке  $B_2$ .

Далее строятся биссектрисы  $N_2B_2$  и  $K_2M_2$ , и нормали к этим биссектрисам образуют касательные к зеркалам. Этот процесс повторяется до полного построения профилей главного и вспомогательного зеркал.

По указанной методике было построено и исследовано несколько вариантов апланатических ГР-антенн.

Как показало исследование, апланатическая антенна действительно имеет меньшие искажения волнового фронта при сканировании, однако специфика конфигурации антенны заставляет усомниться в возможности использования ее в качестве сканирующей антенны, особенно при большом секторе сканирования — порядка  $\pm 10$  и более градусов.

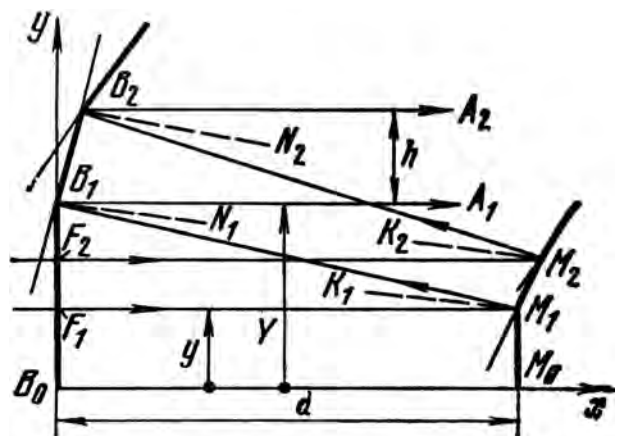


Рис. 351

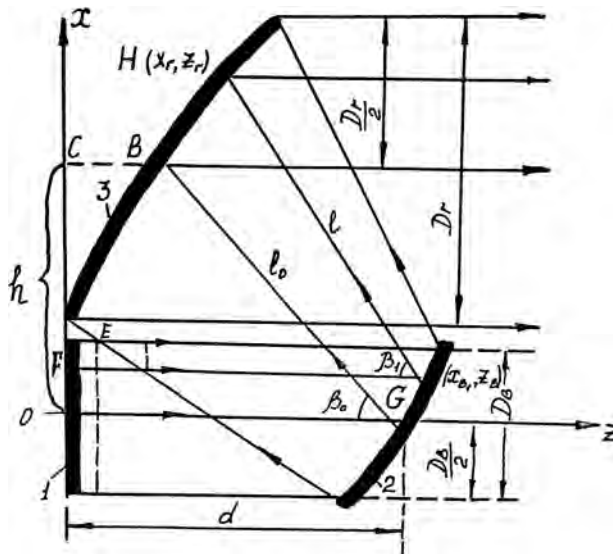


Рис. 352

Рассмотрим теперь расчет неосесимметричной ГР-антенны, облучающая система которой создает параллельный пучок лучей. На рис. 352 показана такая антенна. Здесь 1 — облучатель, условно расположенный в плоскости  $XOY$ , 2 — вспомогательное зеркало, 3 — главное зеркало. Можно предположить, что лучи облучателя в плоскости  $XOY$  расположены симметрично относительно оси  $Z$ , а соответствующий ему луч в раскрыве выходит на расстоянии  $x = R$ . Пусть начальными точками будут: на вспомогательном зеркале точка с координатами  $x = 0; z = d$ , на главном зеркале ей соответствует точка с координатами  $x = h, z = d - \sqrt{l_0^2 - h^2}$ , где  $l_0$  также является заранее заданной величиной.

Для расчета профиля зеркал в плоскости  $XOZ$  запишем следующую систему формул. Первое соотношение соответствует условию получения равномерного фазового распределения

$$z_B + l - z_T = C = \text{const}, \quad (92)$$

где  $C$  — эталонный оптический путь. В качестве такого пути принята сумма путей от плоскости  $XOY$  вдоль оси  $z$  до вспомогательного зеркала (отрезок  $d$ ), от вспомогательного зеркала до главного ( $l_0 = AB$ ) минус отрезок  $BC$ :

$$c = d + l_0 - (z_T)_B = l_0 + \sqrt{l_0^2 - h^2}. \quad (93)$$

Запишем далее выражение для проекций отрезков произвольного луча  $FGH$  на ось  $Z$  и на ось  $X$  соответственно:

$$\begin{aligned} 1. \quad z_B - l \cos \beta_1 &= z_T, \\ 2. \quad x_T - x_B &= l \sin \beta_1. \end{aligned} \quad (94)$$

Эквивалентом условия синусов Аббе при сканировании в плоскости чертежа будет выражение

$$x_T = h + F \sin \frac{\pi x_B}{D_B/2}, \quad (95)$$

где  $x_B$  определяет положение луча облучателя по отношению к центру его раскрыва ( $x = 0$ ),  $D_B$  — размер раскрыва облучателя в плоскости  $XOZ$ ,  $F$  — постоянная величина, эквивалентная фокусному расстоянию в осесимметричных апланатических антеннах.

Еще одно необходимое соотношение — это уравнение, определяющее направление нормали к поверхности зеркала

$$dz_B/dx_B = \text{tg}(\beta_1/2). \quad (96)$$

Решая совместно (94.1) и (93), получим

$$l = c/(1 + \cos \beta_1). \quad (97)$$

Подставляя (97) и (94.2), получим

$$x_T - x_B = (c \sin \beta_1)(1 + \cos \beta_1) = \text{ctg} \beta.$$

Подставляя сюда (95) и (96), окончательно получим дифференциальное уравнение для вспомогательного зеркала

$$\frac{dz_B}{dx_B} = \frac{1}{C} \left( h - F \sin \left( \frac{\pi x_B}{D_B/2} \right) - x_B \right). \quad (98)$$

После решения этого уравнения можно определить координаты профиля главного зеркала

$$z_T = z_B - (c \cos \beta_1)/(1 + \cos \beta_1), \quad (99)$$

$$x_T = h + F \sin \left( \frac{\pi x_B}{D_B/2} \right),$$

где  $\beta_1$  определяется из (96).

В ряде случаев для целей сканирования конструктивно может оказаться более предпочти-

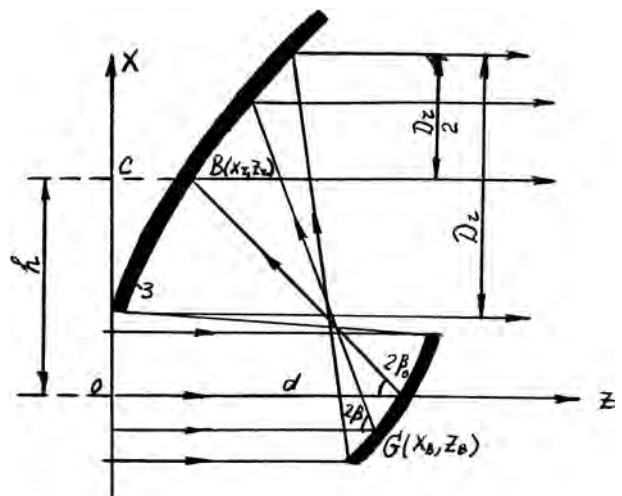


Рис. 353

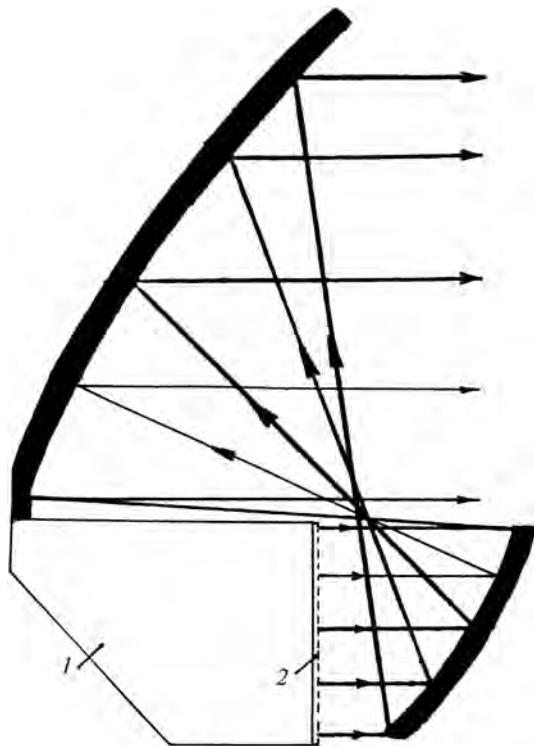


Рис. 354

тельной схема, представленная на рис. 353. Здесь, как легко видеть, облучающая система может быть придвинута почти вплотную к вспомогательному зеркалу, тогда как в схеме рис. 352 ее положение ограничивается плоскостью, проходящей через точку  $E$ . При дальнейшем приближении облучателей к вспомогательному зеркалу в схеме рис. 352 произойдет экранирование части лучей, отражающихся от вспомогательного зеркала.

Для расчета антенны, схема которой представлена на рис. 353 легко получить аналогичную систему формул:

для вспомогательного зеркала

$$\frac{dz_B}{dx_B} = \frac{1}{C} \left[ h - F \sin \left( \frac{\pi x_B}{D_B/2} \right) - x_B \right],$$

для главного зеркала

$$z_\Gamma = z_B + (c \cos \beta_1) / (1 + \cos \beta_1),$$

$$x_\Gamma = h - F \sin \left( \frac{\pi x_B}{D_B/2} \right).$$

Возможная схема реализации ТР-антенны представлена на рис. 354. Здесь 1 — башня РЛС, 2 — система облучателей.



## БИФОКАЛЬНЫЕ АПЛАНАТЫ

Особенностью обычных апланатических антенн является то, что у них имеется только один фокус, лежащий на оси антенны, и при выносе источника из этого фокуса в процессе сканирования диаграмма направленности искажается пропорционально этому выносу. Возможно ли построение двухзеркальных антенн с двумя фокусами — бифокальных антенн [11]?

Принцип действия антенны можно пояснить с помощью рис. 355. Здесь  $F_1$  и  $F_2$  являются фокусными точками антенны; зеркало  $I$  является главным, а зеркало  $II$  — вспомогательным. При расположении облучателя в точке  $F_2$  электромагнитная энергия отражается от вспомогательного, а затем главного зеркала, и в раскрыве антенны будет получен плоский волновой фронт, наклоненный на угол  $+\alpha$  по отношению к вер-

тикальной оси. При расположении облучателя в точке  $F_1$  будет получен плоский фронт, наклоненный на угол  $-\alpha$  к вертикальной оси. Этим волновым фронтам будут соответствовать две диаграммы направленности, максимумы которых образуют с горизонталью углы  $\pm\alpha$ .

В процессе сканирования источник из точек  $F_1$  и  $F_2$  перемещается по некоторой фокальной кривой  $F_1DF_2$ .

Рассмотрим процесс построения профилей главного и вспомогательного зеркал, исходя из того, что антенна должна иметь два фокуса и в ней должно выполняться условие апланатизма. Процесс построения проиллюстрируем, используя приближенный метод касательных.

Зададим точки фокусов  $F_1$  и  $F_2$  симметрично относительно оси  $AB$  (рис. 356). Пусть антенна

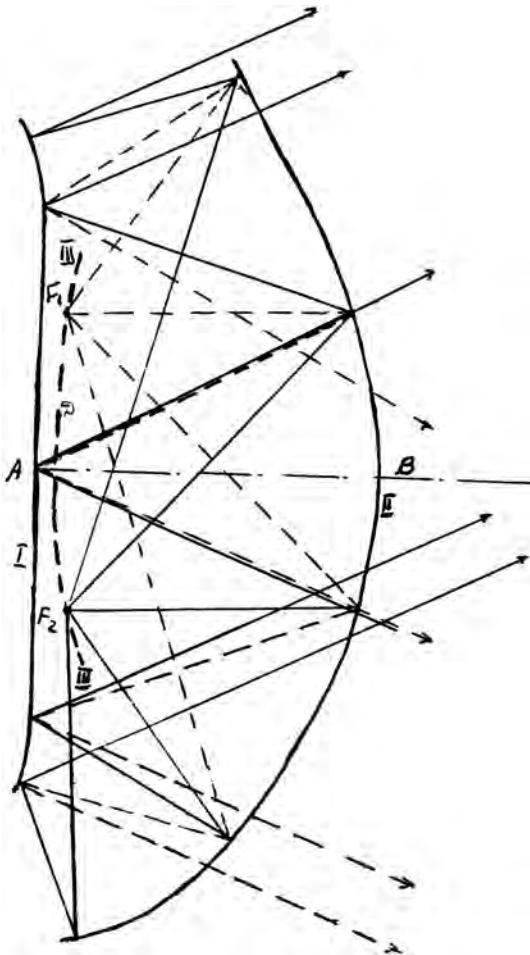


Рис. 355

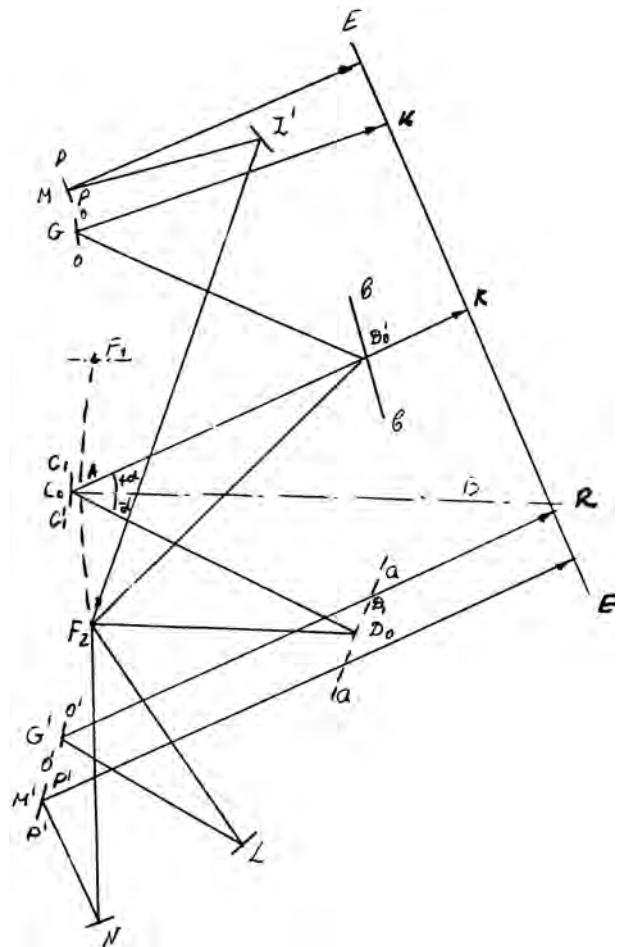


Рис. 356

обладает осевой симметрией. Расположим в некоторой точке  $C_0$  линию  $C_1C'_1$ , перпендикулярную оси  $AB$ . Эта линия является одновременно и касательной к главному зеркалу в точке  $C_0$ . Построение ведется попеременно в режиме приема и передачи.

Пусть в точку  $C_0$  под углом  $+\alpha$  попадает луч  $KC_0$ , принадлежащий плоскому фронту  $CE$ , образующему угол  $\alpha$  с вертикалью. Этот луч после отражения от главного зеркала должен попасть в фокус  $F_2$  (в фокус  $F_1$  попадает луч, который в точку  $C_0$  попадает под углом  $-\alpha$ ).

Выберем на отраженном луче  $C_0D_0$  точку  $D_0$  и через эту точку проведем касательную  $aa$  таким образом, чтобы луч  $KC_0D_0F_2$ , отразившись от нее, попал в фокус  $F_2$ .

В силу симметрии касательной  $aa$  должна соответствовать касательная  $a'a'$  выше оси. Пусть теперь на эту касательную попадает луч  $F_2D'_0$  из фокуса  $F_2$ . Очевидно, этот луч после отражения от главного зеркала должен пройти параллельно лучу  $C_0K$  и для него должно выполняться условие постоянства оптических путей:

$$F_2D_0 + D_0C_0 + C_0K = \\ = F_2D'_0 + D'_0G + GH = H = \text{const.}$$

Поэтому точка  $G$  главного зеркала определяется однозначно, так же как и касательная  $oo$  к главному зеркалу в этой точке.

В силу симметрии касательной  $oo$  в точке  $G$  должна соответствовать касательная  $o'o'$  в точке  $G'$ . Если в эту точку направить луч, параллельный лучу  $C_0K$ , то ему должна быть поставлена в соответствие касательная к вспомогательному зеркалу (точка  $L$ ), однозначно определяемая из условия постоянства оптических путей.

Продолжая изложенную процедуру построения, получим систему однозначно определяемых опорных точек, которые еще не образуют непрерывную поверхность ни главного, ни вспомогательного зеркала.

Рассмотрим теперь процесс построения промежуточных точек на главном и вспомогательном зеркалах антенны, исходя из условий апланатизма и применяя тот же приближенный метод касательных (рис. 357).

Разобьем угол  $D_0F_2D'_0$ , соответствующий первой паре узловых точек на вспомогательном зеркале, на целое число небольших углов в соответствии с требуемой точностью построения. Пусть луч  $F_2D_1$ , идущий под углом  $\Delta\theta$  к лучу  $F_2D_0$ , пересекает касательную  $D_0D_1$  в точке  $D_1$ . На основании условия синусов Аббе можно найти ординату  $y_1$  соответствующего луча в раскрыве относительно луча  $KC_0$ :  $y_1 = f \sin \Delta\theta$ . Этот луч в промежутке между первыми узловыми точками главного зеркала идет параллельно лучу  $KC_0$  и пересекает касательную  $C_0C_1$  в точке  $C_1$ . Соединив точки  $C_1$  и  $D_1$ , получим луч  $F_2D_1C_1K_1$ ,

выходящий из фокуса  $F_2$  и удовлетворяющий условию синусов. Соответствующий луч, идущий из симметричного фокуса  $F_1$ , выходит из антенны под углом  $-\alpha$ . Согласно методу касательных в точках  $D_1$  и  $C_1$  можно построить новые касательные к вспомогательному и главному зеркалам. Эти касательные, очевидно, перпендикулярны биссектрисам углов  $C_1D_1F_2$  и  $K_1C_1D_1$  соответственно.

Рассмотрим теперь луч, идущий под углом  $2\Delta\theta$  к лучу  $F_2D_0$ . Он пересекает касательную  $D_1D_2$  в точке  $D_2$ . Этому лучу по условию синусов будет соответствовать луч, идущий под углом  $+\alpha$  на расстоянии  $y_2 = f \sin 2\Delta\theta$  от луча  $KC_0$  и пересекающий касательную  $C_2C_1$  в точке  $C_2$ . Полученному лучу  $F_2D_2C_2K_2$  соответствует касательная  $C_2C_3$  к главному зеркалу. Соответствующий луч, идущий из фокуса  $F_1$ , также удовлетворяет условию синусов и выходит из антенны под углом  $-\alpha$ .

Изложенная процедура может быть продолжена для построения профилей и за точками  $D_3$  и  $C_3$ , в результате чего будет получена антенна, которая обладает двумя фокусами и удовлетворяет условию апланатизма.

Такое сочетание в одной антенне уже известных по отдельности свойств дает новый практически ценный эффект, заключающийся в том, что при выносе облучателя из фокусов  $F_1$  и  $F_2$  будут отсутствовать кубические искажения диаграммы направленности, в результате чего может быть обеспечено сканирование в значительно большем секторе углов, чем это имеет место в известных бифокальных и апланатических антеннах.

При расчете координат ее узловых точек будет исходить из того, что нам известны характерные

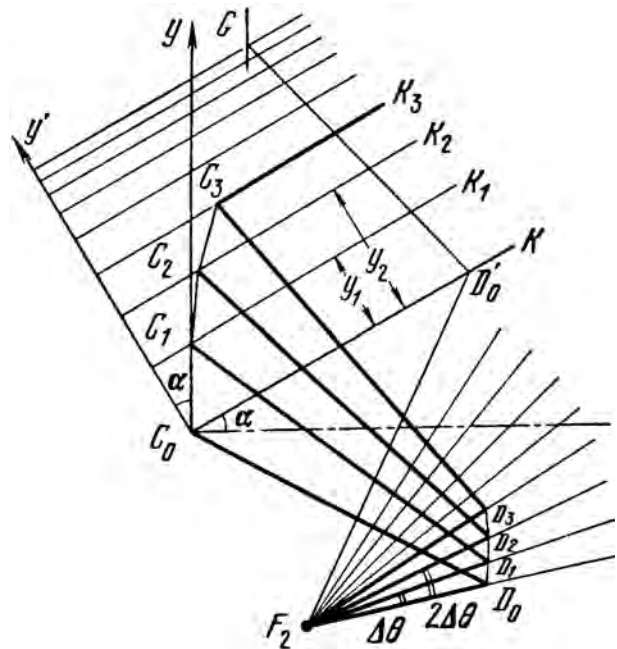


Рис. 357

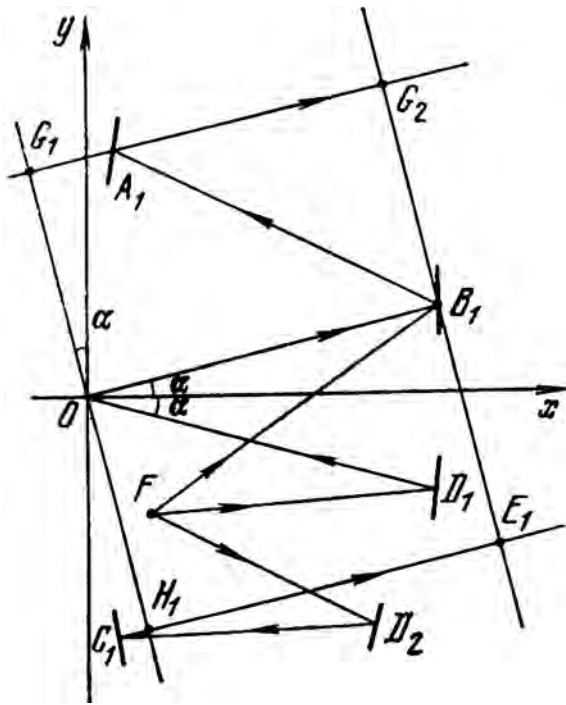


Рис. 358

параметры этой антенны, а именно:  $\alpha$  — угол между направлением лучей, отраженных от главного зеркала, и осью  $x$ ;  $x_F, y_F$  — координаты фокуса;  $OD_1$  — расстояние между началом координат и первой узловой точкой вспомогательного зеркала (рис. 358).

При этом должны выполняться следующие условия:

1. Лучи, отраженные от узловых точек главного зеркала, должны быть параллельны.
2. Координаты узловых точек должны быть такими, чтобы оптическая длина пути каждого луча, проходящего через эти точки, была постоянной, т. е. (рис. 358)

$$FD_1 + D_1O + OB_1 = FB_1 + B_1A_1 + A_1G_2 = \\ = FD_2 + D_2C_1 + C_1E_1 = \text{const.}$$

Линия  $B_1G_2$  перпендикулярна лучам, отраженным от главного зеркала и соответствует фронту волны.

Оптическую длину пути каждого луча удобнее отсчитывать от линии  $OG_1$ , которая перпендикулярна лучам, отраженным от главного зеркала, и проходит через начало координат (рис. 358). Тогда условие постоянства пути примет вид

$$FD_1 + D_1O = FB_1 + B_1A_1 - A_1G_1 = \\ = FD_2 + D_2C_1 + C_1H_1 = p = \text{const.}$$

3. Отражение от узловых точек происходит по законам геометрической оптики.

4. Узловые точки главного и вспомогательного зеркал соответственно симметричны относительно оси  $x$ .

При определении координат узловых точек профилей зеркал будем исходить из характерных параметров антенны:  $\alpha$  — угол между направлением лучей, отраженных от поверхности главного зеркала, и осью  $x$ ;  $x_F, y_F$  — координаты фокуса;  $d$  — расстояние между вершиной главного зеркала и первой узловой точкой вспомогательного зеркала.

Вершину главного зеркала считаем нулевой узловой точкой и помещаем всегда в начало координат. Координаты первой узловой точки вспомогательного зеркала  $D_1$  (рис. 359):

$$x_{D_1} = d \cos \alpha; y_{D_1} = -d \sin \alpha.$$

Угол между нормалью к поверхности вспомогательного зеркала в точке  $D_1$  и осью  $x$

$$\alpha_{D_1}^H = \pi + \frac{1}{2}(\alpha_{FD_1} - \alpha),$$

где  $\alpha_{FD_1} = \arctg \frac{y_{D_1} - y_F}{x_{D_1} - x_F}$  — угол между прямой  $FD_1$

и осью  $x$ .

В силу симметрии зеркал относительно оси  $x$  точке  $D_1$  соответствует точка  $B_1$  верхней половины вспомогательного зеркала с координатами:

$$x_{B_1} = d \cos \alpha; y_{B_1} = d \sin \alpha.$$

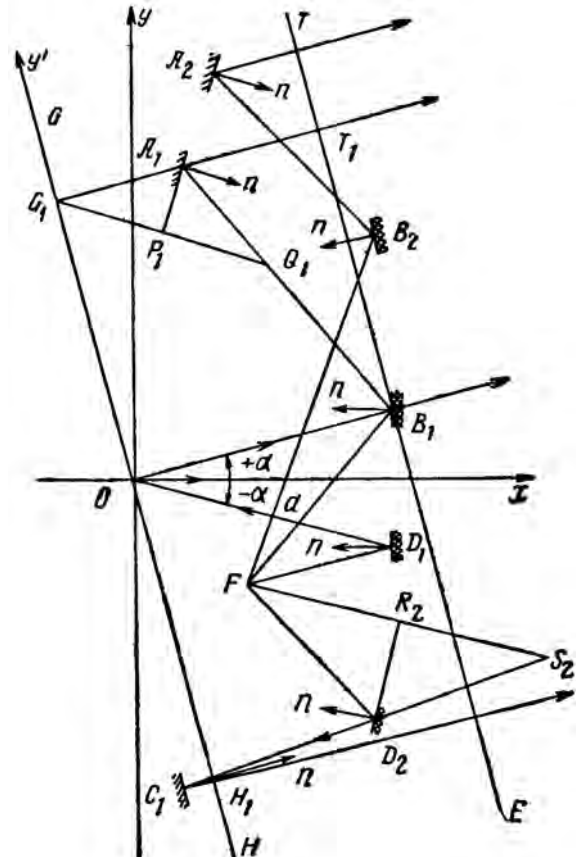


Рис. 359

Угол между нормалью к поверхности вспомогательного зеркала в точке  $B_1$  и осью  $x$

$$\alpha_{B_1}^H = \pi - \frac{1}{2}(\alpha_{FD_1} - \alpha).$$

Координаты остальных узловых точек профилей зеркал можно определить по формулам, приведенным ниже в виде, удобном для расчета на ЭВМ. Координаты узловых точек главного зеркала, расположенных выше оси  $x$ :

$$x_{A_i} = \frac{k_{B_i A_i} x_{B_i} - k k_{A_i} x_{P_i} - y_{B_i} + y_{P_i}}{k_{B_i A_i} - k k_{A_i}},$$

$$y_{A_i} = k_{B_i A_i} (x_{A_i} - x_{B_i}) + y_{B_i},$$

где  $x_{B_i}, y_{B_i}$  — координаты узловых точек вспомогательного зеркала, расположенных выше оси  $x$ ;  $k_{B_i A_i} = \text{tg} \alpha_{B_i A_i}$  — угловой коэффициент прямой  $B_i A_i$  с осью  $x$ ;  $\alpha_{B_i A_i} = -\alpha_{F A_i} - \alpha_{F A_i} - \alpha_{D_i C_{i-1}}$  — угол между прямой  $B_i A_i$  и осью  $x$ ;  $\alpha_{F B_i} =$

$$= \text{arctg} \frac{y_{B_i} - y_F}{x_{B_i} - x_F} \text{ — угол между прямой } F B_i \text{ и осью } x;$$

$$\alpha_{F D_i} = \text{arctg} \frac{y_{D_i} - y_F}{x_{D_i} - x_F} \text{ — угол между прямой } F D_i \text{ и}$$

осью  $x$ ;  $\alpha_{D_i C_{i-1}} = -2\alpha - \alpha_{B_{i-1} A_{i-1}}$  — угол между прямой  $D_i C_{i-1}$  и осью  $x$  (для  $i = 1$   $\alpha_{D_i C_{i-1}} = -\alpha$ );

$k k_{A_i} = -\text{ctg} \alpha_{A_i}^H$  — угловой коэффициент касательной к поверхности главного зеркала в точке  $A_i$

с осью  $x$ ;  $\alpha_{A_i}^H = \frac{1}{2}(\alpha + \alpha_{B_i A_i})$  — угол между нормалью к поверхности главного зеркала в точке  $A_i$  и осью  $x$ ;

$$x_{P_i} = x_{Q_i} - \frac{1}{2} Q_i G_i \cos \psi_{A_i};$$

$$y_{P_i} = y_{Q_i} - \frac{1}{2} Q_i G_i \sin \psi_{A_i};$$

$$Q_i G_i = [(x_{Q_i} - x_{G_i})^2 + (y_{Q_i} - y_{G_i})^2]^{1/2};$$

$$x_{Q_i} = x_{B_i} - B_i Q_i \cos \alpha_{B_i A_i};$$

$$y_{Q_i} = y_{B_i} - B_i Q_i \sin \alpha_{B_i A_i}; \quad B_i Q_i = d + F D_1 - F B_i;$$

$$F B_i = [(x_{B_i} - x_F)^2 + (y_{B_i} - y_F)^2]^{1/2};$$

$$x_{G_i} = \frac{k_{A_i}^H x_{Q_i} - y_{Q_i}}{k_{A_i}^H - k_{GH}};$$

$$y_{G_i} = k_{GH} x_{G_i}; \quad k_{GH} = -\text{ctg} \alpha; \quad k_{A_i}^H = \text{tg} \alpha_{A_i}^H;$$

$i$  — порядковый номер узловых точек.

Координаты узловых точек главного зеркала, расположенных ниже оси  $x$ :  $x_{C_i} = x_{A_i}$ ;  $y_{C_i} = -y_{A_i}$ . Угол между нормалью и поверхностью главного зеркала в точке  $C_i$  и осью  $x$   $\alpha_{C_i}^H = -\frac{1}{2}(\alpha + \alpha_{B_i A_i})$ .

Координаты узловых точек вспомогательного зеркала, расположенных ниже оси  $x$ :

$$\left. \begin{aligned} x_{D_i} &= \frac{k_{D_i C_{i-1}} x_{C_{i-1}} - k k_{D_i} x_{R_i} - y_{C_{i-1}} + y_{R_i}}{k_{D_i C_{i-1}} - k k_{D_i}} \\ y_{D_i} &= k_{D_i C_{i-1}} (x_{D_i} - x_{C_{i-1}}) + y_{C_{i-1}} \end{aligned} \right| \text{ для } i \geq 2,$$

где  $x_{C_{i-1}}, y_{C_{i-1}}$  — координаты узловых точек главного зеркала, расположенных ниже оси  $x$ ;  $k k_{D_i} = -\text{ctg} \alpha_{F S_i}$  — угловой коэффициент касательной к поверхности вспомогательного зеркала в точке  $D_i$  с осью  $x$ ;  $k_{D_i C_{i-1}} = \text{tg} \alpha_{D_i C_{i-1}}$  — угловой коэффициент прямой  $D_i C_{i-1}$  с осью  $x$ ;  $\alpha_{F S_i} =$

$$= \text{arctg} \frac{y_{S_i} - y_F}{x_{S_i} - x_F} \text{ — угол между прямой } F S_i \text{ и осью } x;$$

$$x_{S_i} = x_{C_{i-1}} + C_{i-1} S_i \cos \alpha_{D_i C_{i-1}};$$

$$y_{S_i} = y_{C_{i-1}} + C_{i-1} S_i \sin \alpha_{D_i C_{i-1}};$$

$$C_{i-1} S_i = d + F D_1 + C_{i-1} H_{i-1};$$

$$C_{i-1} H_{i-1} = x_{C_{i-1}} \cos \alpha + y_{C_{i-1}} \sin \alpha;$$

$$x_{R_i} = x_F + \frac{1}{2} F S_i \cos \alpha_{F C_i};$$

$$y_{R_i} = y_F + \frac{1}{2} F S_i \sin \alpha_{F C_i};$$

$$F S_i = [(x_{S_i} - x_F)^2 + (y_{S_i} - y_F)^2]^{1/2}.$$

Угол между нормалью к поверхности вспомогательного зеркала в точке  $D_i$  и осью  $x$

$$\alpha_{D_i}^H = \pi + \alpha_{F S_i}.$$

Координаты узловых точек вспомогательного зеркала, расположенных выше оси  $x$ :  $x_{B_i} = x_{D_i}$ ;  $y_{B_i} = -y_{D_i}$ .

Угол между нормалью к поверхности вспомогательного зеркала в точках  $B_i$  и осью  $x$

$$\alpha_{B_i}^H = \pi - \alpha_{F S_i}.$$

**Промежуточные точки.** В рассматриваемой антенне плотность лучей в раскрыве должна меняться по апланатическому закону  $y' = f \sin \phi$ . Угол  $\phi$  отсчитывается от прямой  $F D_1$ .

Чтобы профиль главного зеркала прошел через точку  $A_1$ , постоянную  $f$  определяем из формулы:  $f = O G_1 / \sin \gamma$ , где  $\gamma$  — угол  $D_1 F B_1$ .

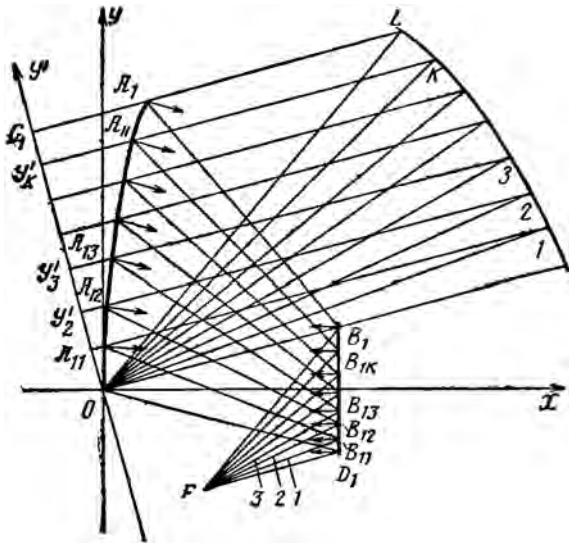


Рис. 360

Каждому лучу источника в пределах угла  $D_1FB_1$  соответствует определенный луч участка  $OG_1$  раскрыва антенны, ордината которого по оси  $y'$

$$y'_k = \frac{OG_1}{\sin \varphi_k} \sin \varphi_k,$$

где  $k$  — порядковый номер луча;  $\varphi_k$  — угол между прямой  $FD_1$  и лучом, идущим от источника.

Или в системе координат  $x; y$ :  $x_k = -y'_k \sin \alpha$ ;  $y_k = y'_k \cos \alpha$ .

Координаты первой промежуточной точки главного зеркала участка  $OA_1$  (рис. 360):  $x_{A_{1,1}} = 0$ ;

$$y_{A_{1,1}} = y'_1 / \cos \alpha.$$

Координаты остальных промежуточных точек главного зеркала участка  $OA_1$ :

$$\left. \begin{aligned} x_{A_{1,k}} &= \frac{k_0 x_k - k k_{A_{1,k-1}} x_{A_{1,k-1}} - y_k + y_{A_{1,k-1}}}{k_0 - k k_{A_{1,k-1}}} \\ y_{A_{1,k}} &= k_0 (x_{A_{1,k}} - x_k) + y_k, \end{aligned} \right\} \text{ для } k \geq 2,$$

где  $k k_{A_{1,k-1}} = -\text{ctg} \left[ \frac{1}{2} (\alpha + \alpha_{BA_{1,k-1}}) \right]$ ;

$$\alpha_{BA_{1,k-1}} = \text{arctg} \frac{y_{A_{1,k-1}} - y_{B_{1,k-1}}}{x_{A_{1,k-1}} - x_{B_{1,k-1}}}.$$

Угол между нормалью к поверхности главного зеркала в точках  $A_{1,k}$  и осью  $x$   $\alpha_{A_{1,k}}^H = \frac{1}{2} (\alpha + \alpha_{BA_{1,k}})$ .

Координаты промежуточных точек вспомогательного зеркала в пределах участка  $D_1B_1$ :

$$x_{B_{1,k}} = \frac{k_{FB_{1,k}} x_F - k k_{B_{1,k-1}} x_{B_{1,k-1}} - y_F + y_{B_{1,k-1}}}{k_{FB_{1,k}} - k k_{B_{1,k-1}}};$$

$$y_{B_{1,k}} = k_{FB_{1,k}} (x_{B_{1,k}} - x_F) + y_F,$$

где  $k_{FB_{1,k}} = \text{tg}(\alpha_{FD_1} + \varphi_k)$ ;

$$k k_{B_{1,k-1}} = -\text{ctg} \left[ \frac{1}{2} (\alpha_{FB_{1,k-1}} + \alpha_{BA_{1,k-1}}) \right];$$

$$\alpha_{FB_{1,k-1}} = \text{arctg} \frac{y_{B_{1,k-1}} - y_F}{x_{B_{1,k-1}} - x_F};$$

для  $k = 1$ :

$$x_{B_{1,k-1}} = x_{D_1}; y_{B_{1,k-1}} = y_{D_1};$$

$$\alpha_{FB_{1,k-1}} = \alpha_{FD_1}; \alpha_{BA_{1,k-1}} = -\alpha.$$

Угол между нормалью к поверхности вспомогательного зеркала в точках  $B_{1,k}$  и осью  $x$

$$\alpha_{B_{1,k}}^H = \pi + \frac{1}{2} (\alpha_{FB_{1,k}} + \alpha_{BA_{1,k}}).$$

Промежуточным точкам  $A_{i,k}$  верхней половины главного зеркала соответствуют симметричные относительно оси  $x$  точки  $C_{i,k}$  нижней половины зеркала (рис. 361). Координаты этих точек:  $x_{C_{i,k}} = x_{A_{i,k}}$ ;  $y_{C_{i,k}} = -y_{A_{i,k}}$ .

Угол между нормалью к поверхности главного зеркала в точках  $C_{i,k}$  и осью  $x$   $\alpha_{C_{i,k}}^H = -\alpha_{A_{i,k}}^H$ .

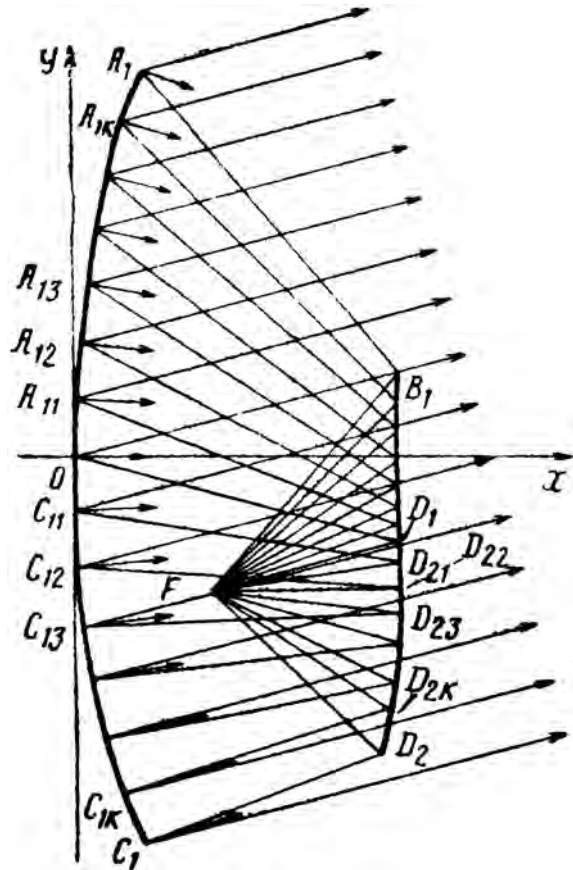


Рис. 361

Координаты промежуточных точек нижней половины вспомогательного зеркала (ниже точки  $D_1$ ):

$$\left. \begin{aligned} x_{D_{i,k}} &= \\ &= \frac{k_{DC_{i,k}} x_{C_{i,k}} - kk_{D_{i,k-1}} x_{D_{i,k-1}} - y_{C_{i,k}} + y_{D_{i,k-1}}}{k_{DC_{i,k}} - kk_{D_{i,k-1}}} \\ y_{D_{i,k}} &= k_{DC_{i,k}} (x_{D_{i,k}} - x_{C_{i,k}}) + y_{C_{i,k}}, \end{aligned} \right| \text{ для } i \geq 2,$$

где

$$k_{DC_{i,k}} = -\text{tg}(2\alpha + \alpha_{BA_{i,k}});$$

$$kk_{D_{i,k-1}} = -\text{ctg}\left[\frac{1}{2}(\alpha_{FD_{i,k-1}} + \alpha_{DC_{i,k-1}})\right];$$

$$\alpha_{BA_{i,k}} = \text{arctg} \frac{y_{A_{i,k}} - y_{B_{i,k}}}{x_{A_{i,k}} - x_{B_{i,k}}};$$

$$\alpha_{FD_{i,k-1}} = \text{arctg} \frac{y_{D_{i,k-1}} - y_F}{x_{D_{i,k-1}} - x_F};$$

$$\alpha_{DC_{i,k-1}} = \text{arctg} \frac{y_{C_{i,k-1}} - y_{D_{i,k-1}}}{x_{C_{i,k-1}} - x_{D_{i,k-1}}};$$

для  $k = 1$ :  $kk_{D_{i,k-1}} = kk_{D_{i-1}}$ ;  $k_{D_{i,k-1}} = x_{D_{i-1}}$ ;  $y_{D_{i,k-1}} = y_{D_{i-1}}$ ;  $\alpha_{FD_{i,k-1}} = \alpha_{FD_{i-1}}$ ;  $\alpha_{CD_{i,k-1}} = \alpha_{CD_{i-1}}$ .

Угол между нормалью к поверхности вспомогательного зеркала в точках  $D_{i,k}$  и осью  $x$

$$\alpha_{D_{i,k}}^H = \pi + \frac{1}{2}(\alpha_{FD_{i,k}} + \alpha_{CD_{i,k}}).$$

Промежуточным точкам  $D_{i,k}$  нижней половины вспомогательного зеркала соответствуют симметричные относительно оси  $x$  точки  $B_{i,k}$  верхней половины вспомогательного зеркала. Координаты этих точек:  $x_{B_{i,k}} = x_{D_{i,k}}$ ;  $y_{B_{i,k}} = -y_{D_{i,k}}$ .

Угол между нормалью к поверхности вспомогательного зеркала в точках  $B_{i,k}$  и осью  $x$

$$\alpha_{B_{i,k}}^H = -\alpha_{D_{i,k}}^H.$$

Координаты промежуточных точек верхней половины главного зеркала выше точки  $A_1$

$$\left. \begin{aligned} x_{A_{i,k}} &= \\ &= \frac{k_{BA_{i,k}} x_{B_{i,k}} - kk_{A_{i,k-1}} x_{A_{i,k-1}} - y_{B_{i,k}} + y_{A_{i,k-1}}}{k_{BA_{i,k}} - kk_{A_{i,k-1}}} \\ y_{A_{i,k}} &= k_{BA_{i,k}} (x_{A_{i,k}} - x_{B_{i,k}}) + y_{B_{i,k}}, \end{aligned} \right| \text{ для } i \geq 2,$$

где  $k_{BA_{i,k}} = -\text{tg}(\alpha_{FD_{i-1,k}} + \alpha_{DC_{i-1,k}} + \alpha_{FB_{i,k}})$ ;

$$\alpha_{FD_{i-1,k}} = \text{arctg} \frac{y_{D_{i-1,k}} - y_F}{x_{D_{i-1,k}} - x_F};$$

$$\alpha_{DC_{i-1,k}} = \text{arctg} \frac{y_{C_{i-1,k}} - y_{D_{i-1,k}}}{x_{C_{i-1,k}} - x_{D_{i-1,k}}};$$

$$\alpha_{FB_{i,k}} = \text{arctg} \frac{y_{B_{i,k}} - y_F}{x_{B_{i,k}} - x_F};$$

$$kk_{A_{i,k-1}} = -\text{ctg}\left[\frac{1}{2}(\alpha + \alpha_{BA_{i,k-1}})\right];$$

$$\alpha_{BA_{i,k-1}} = \text{arctg} \frac{y_{A_{i,k-1}} - y_{B_{i,k-1}}}{x_{A_{i,k-1}} - x_{B_{i,k-1}}};$$

для  $k = 1$ :  $kk_{A_{i,k-1}} = kk_{A_{i-1}}$ ;  $x_{A_{i,k-1}} = x_{A_{i-1}}$ ;

$y_{A_{i,k-1}} = y_{A_{i-1}}$ ;  $\alpha_{FD_{i-1,k}} = \alpha_{FD_{i-1}}$ .

Угол между нормалью к поверхности главного зеркала в точках  $A_{i,k}$  и осью  $x$   $\alpha_{A_{i,k}}^H = \frac{1}{2}(\alpha + \alpha_{BA_{i,k}})$ .

По приведенным выше формулам были рассчитаны профили зеркал бифокальной двухзеркальной апланатической антенны для различных параметров. На рис. 362 приведены профили зеркал при различных положениях облучателя вдоль оси  $x$ ; на рис. 363 — профили зеркал при различных положениях облучателя вдоль оси  $y$ ; на рис. 364 — при различных углах распространения плоского фронта волны на выходе антенны; на рис. 365 — при различном расстоянии  $d$  между вершиной главного зеркала и первой узловой точкой вспомогательного зеркала при фиксированном положении облучателя. При

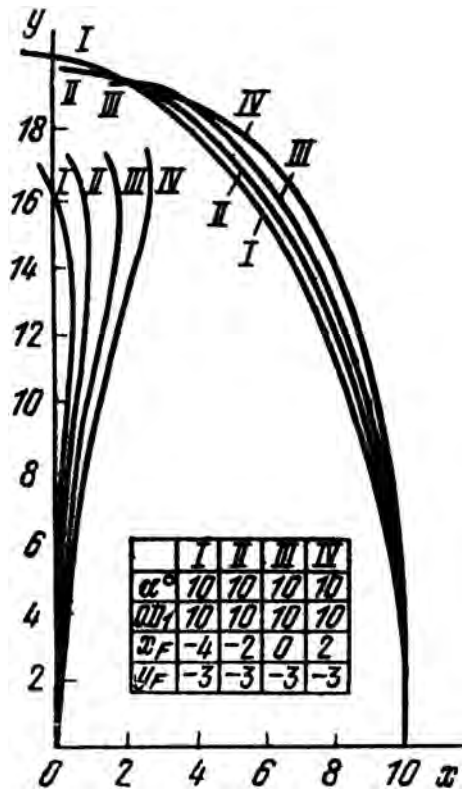


Рис. 362

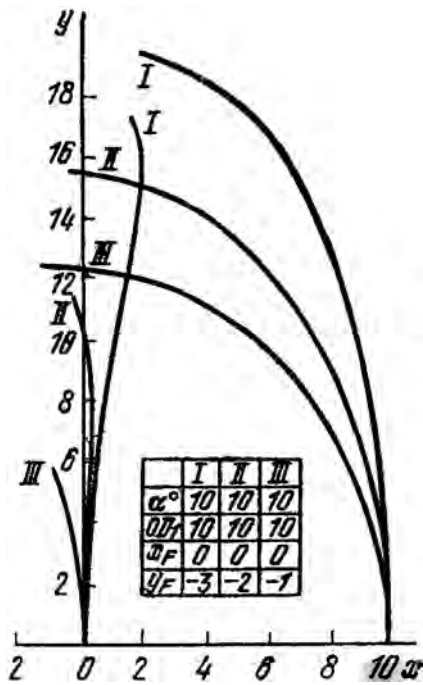


Рис. 363

смещении фокальной точки вдоль оси  $x$  вправо профили зеркал отклоняются также вправо. Диаметр зеркал почти не меняется.

При смещении фокальной точки вдоль оси  $y$ , по мере удаления ее от оси  $x$ , профили зеркал отклоняются вправо. Диаметр зеркал увеличивается, причем диаметр главного зеркала увеличивается быстрее, чем вспомогательного.

При увеличении угла распространения плоского фронта волны профили зеркал отклоняются влево. Диаметр зеркал уменьшается, причем

диаметр главного зеркала уменьшается быстрее, чем вспомогательного. Осевой размер между зеркалами несколько уменьшается.

При увеличении расстояния между вершиной главного зеркала и первой узловой точкой вспомогательного зеркала профили зеркал отклоняются влево. Диаметр зеркал увеличивается, причем диаметр вспомогательного зеркала увеличивается быстрее, чем главного. Осевой размер между зеркалами также увеличивается.

Форма профилей зеркал бифокальных антенн зависит от соотношения основных параметров, характерных для этих антенн. Характерными параметрами двухзеркальных бифокальных антенн являются следующие:  $x_f, y_f$  — координаты фокусов;  $\alpha$  — угол между направлениями лучей, отраженных от поверхности главного зеркала в режиме передачи, и осью  $x$ ;  $d$  — расстояние между вершиной главного зеркала и первой узловой точкой вспомогательного зеркала.

Параметры  $x_f, y_f, \alpha, d$  определяют систему узловых точек профилей вспомогательного и главного зеркал. Хотя узловые точки не определяют полностью форму профилей зеркал антенны и ее свойства, но поскольку профили вспомогательного и главного зеркал должны пройти через соответствующие узловые точки, расположение узловых точек в значительной мере позволяет судить о характерных особенностях формы профилей зеркал. Например, если  $y$ -ые координаты узловых точек вспомогательного зеркала меньше  $y$ -ых соответствующих узловых точек главного зеркала, то размеры вспомогательного зеркала будут меньше размеров главного зеркала, независимо от свойств антенны, если  $x$ -ые координаты узловых точек вспомогательного зеркала

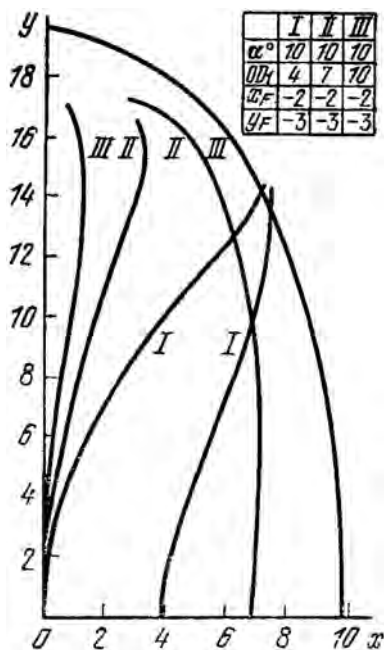


Рис. 364

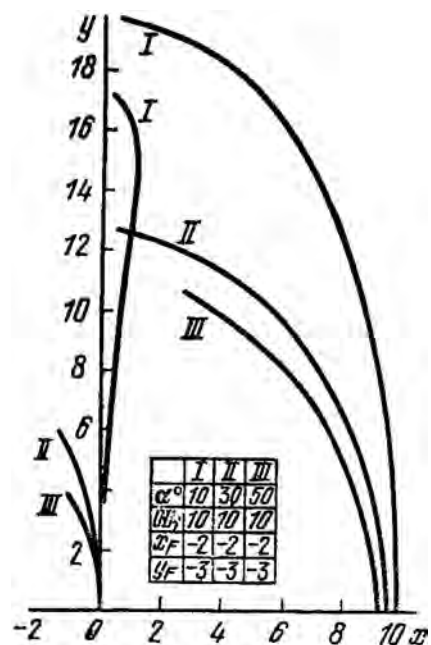


Рис. 365

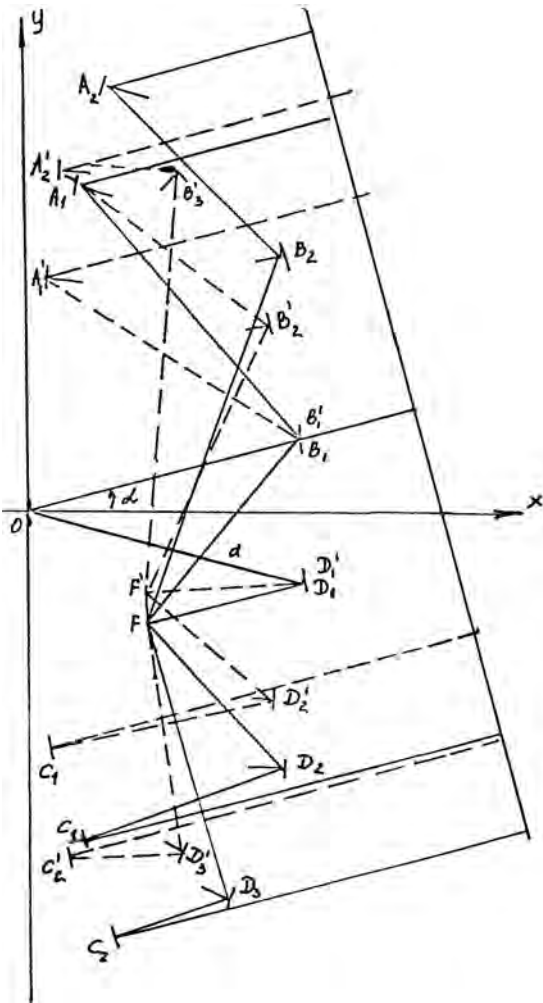


Рис. 366

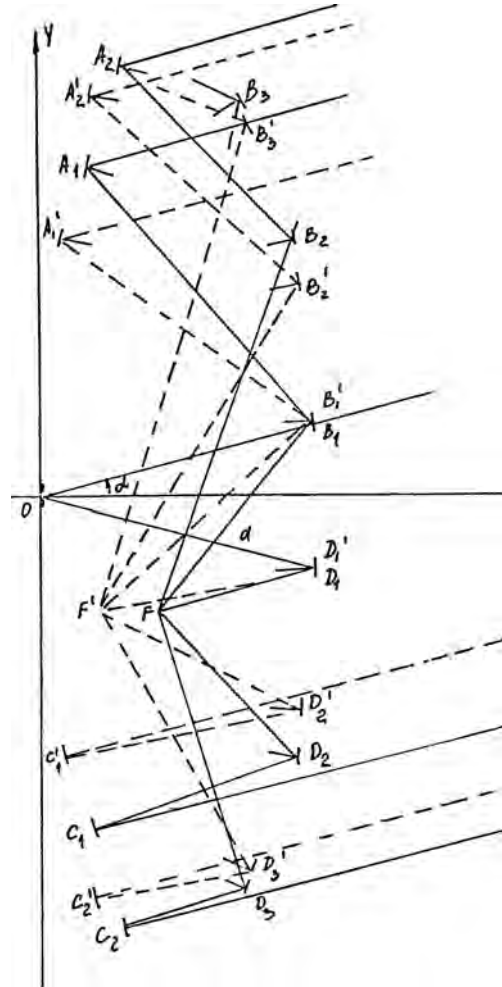


Рис. 367

по мере увеличения номера точек отклоняются вправо, то и профиль вспомогательного зеркала будет также отклоняться вправо.

На рис. 366—369 изображено влияние параметров двухзеркальной бифокальной антенны на расположение узловых точек профилей зеркал. Как видно из приведенных рисунков, расположение первых узловых точек вспомогательного зеркала  $B_1$ ,  $D_1$  зависит только от параметров  $\alpha$  и  $\alpha_1$ , и их расстояние от оси увеличивается с увеличением  $\alpha$  и  $d$ .

На рис. 366, 367 показано влияние на расположение узловых точек профилей зеркал координат расположения фокусов  $x_f$  и  $y_f$ . При увеличении  $x_f$  расстояние между узловыми точками и вспомогательного зеркала и осью  $x$  увеличивается, и они смещаются в отрицательном направлении оси  $x$ .

Узловые точки главного зеркала удаляются от оси  $x$  и смещаются в положительную сторону  $x$ . При увеличении  $y_f$  по модулю узловые точки вспомогательного и главного зеркал располагаются дальше от оси  $x$  и смещаются в положительную сторону оси  $y$ . Из рисунков видно, что при увеличении  $x_f$  и  $|y_f|$  профиль главного зеркала

будет отклоняться в положительном направлении оси  $x$ .

На рис. 368 показано изменение расположения узловых точек профилей зеркал в зависимости от угла  $\alpha$ . При увеличении угла  $\alpha$  узловые точки вспомогательного зеркала располагаются дальше от оси  $x$ , а узловые точки главного зеркала располагаются ближе к оси  $x$ . При этом узловые точки обоих зеркал отклоняются влево.

На рис. 369 показано влияние параметра  $d$  на расположение узловых точек профилей зеркал. При увеличении  $d$  узловые точки вспомогательного зеркала удаляются от оси  $x$  и смещаются в положительном направлении оси  $x$ . Узловые точки главного зеркала при этом приближаются к оси  $x$  и смещаются в отрицательном направлении оси  $x$ .

Зная влияние параметров двухзеркальных бифокальных антенн  $x_f$ ;  $y_f$ ;  $\alpha$ ;  $d$  на расположение узловых точек профилей зеркал можно изменить характерные особенности формы профилей зеркал.

Рассмотрим теперь расчет неосесимметричных бифокальных антенн, имеющих два фокуса с точной сходимостью лучей для двух произвольных углов отклонения ДН. Пусть на рис. 370



представлена неосесимметричная антенна ( $I$  — главное зеркало,  $II$  — вспомогательное зеркало), у которой есть два фокуса  $F_1$  и  $F_2$ . Тогда при расположении облучателей в  $F_1$  и  $F_2$  от каждой точки главного зеркала отражаются два луча, образующие с горизонталью углы соответственно  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , причем для обоих фокусов выполняется условие равенства оптических путей:

1.  $r_1 + l_1 - S_1 = r_{01} + l_{01}$
2.  $r_2 + l_2 - S_2 = r_{02} + l_{02} + S_{02}$ .

На рис. 370 угол  $\alpha_2$  принят равным нулю.

Здесь  $r_{01} + l_{01}$  — оптический путь от  $F_1$  до точки  $B$ ;  $r_{02} + l_{02} + S_{02}$  — оптический путь от  $F_1$  до точки  $C$ . На рисунке расчетные плоские волновые фронты проходят через такие точки главного зеркала, от которых лучи отражаются, проходя, соответственно, через  $F_1$  и  $F_2$ . Фокусу  $F_1$  соответствует плоский фронт  $AB$ , а фокусу  $F_2$  фронт  $CD$ .

Для пояснения принципа расчета профилей главного и вспомогательного зеркала бифокальной антенны можно либо решать дифференциальные уравнения, либо воспользоваться методом касательных, который в данном случае состоит в следующем.

Пусть на рис. 371  $A$  и  $B$  — фокусы антенны, симметрично расположенные относительно оси  $y$ . Пусть, далее, отрезок  $KL$  является касательной к главному зеркалу в начале координат, а отрезки  $CD$  и  $EF$  (симметричные относительно оси  $y$ ) — соответствующие касательные к вспомогательному зеркалу; они отражают в фокусы  $A$  и  $B$  лучи  $GN$  и  $HN$ . Облучателям, расположенным в точках  $A$  и  $B$ , должны соответствовать диаграммы направленности, ориентированные под углами  $\pm\alpha$  к горизонтальной оси или плоские волновые фронты, образующие углы  $\pm\alpha$  с вертикалью. Если предположить, что эти фронты проходят через точку  $M$ , то пути  $APNG$  и  $BQNH$  одинаково-

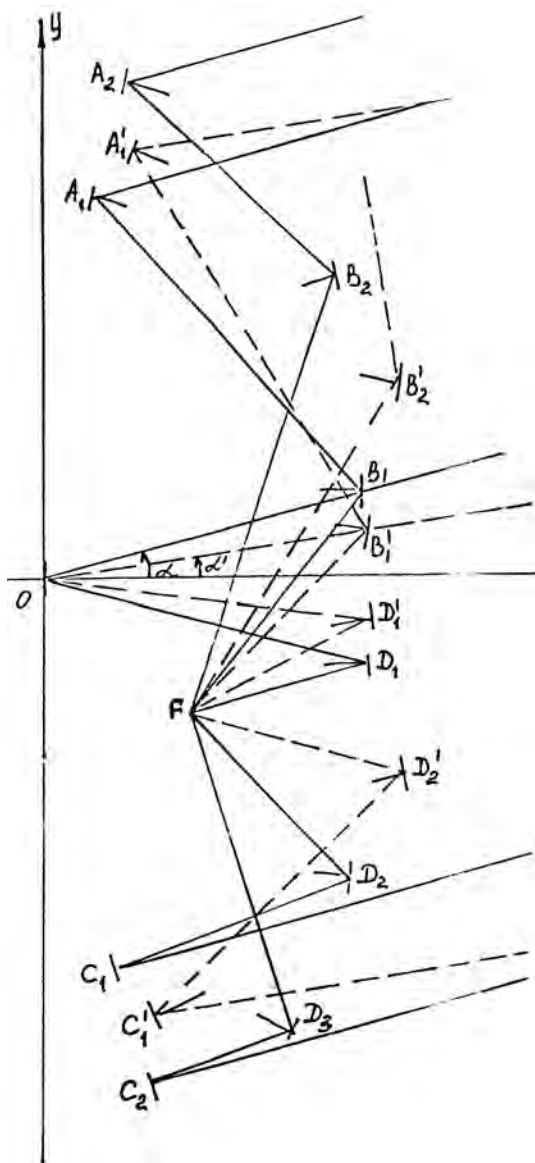


Рис. 368

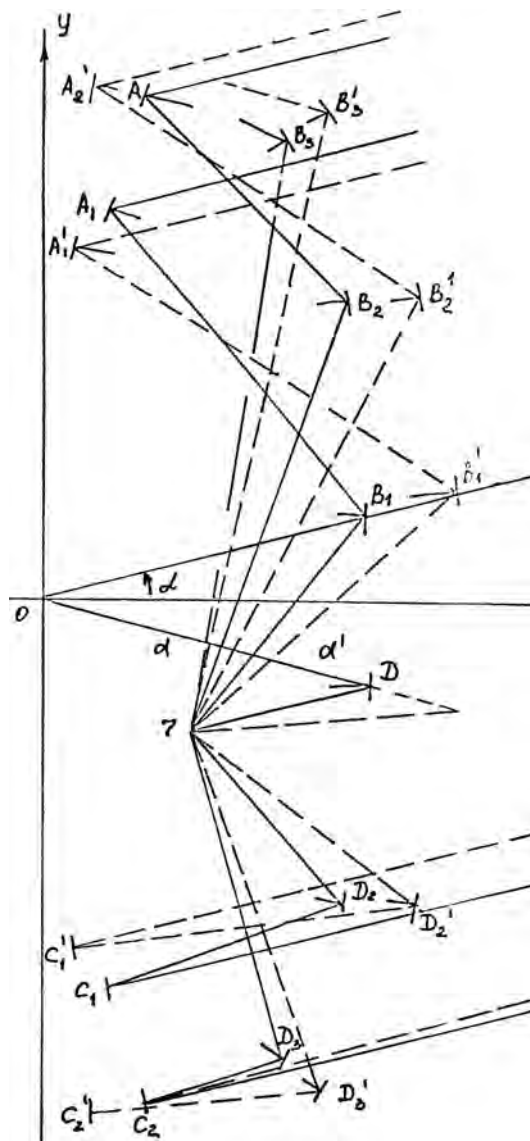


Рис. 369

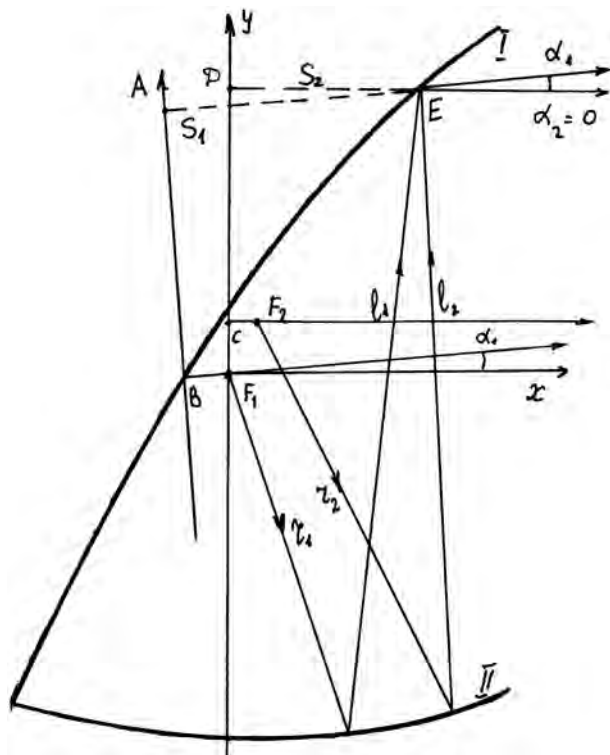


Рис. 370

вы и могут быть приняты за постоянную величину оптического пути для всех лучей. Рассмотрим далее рис. 372, на котором показано построение следующих точек на зеркалах.

Очевидно, что луч из точки  $A$ , падая в точку  $Q$ , должен отразиться от нее и после отражения от главного зеркала должен выйти из антенны параллельно лучу  $NG$ . Точка главного зеркала, в которой отражается этот луч, должна быть найдена из условия постоянства оптических путей и на рис. 372 она обозначена  $R_1$ . Луч, падающий в эту точку  $R_1$  под углом  $(-\alpha)$ , должен отразиться от некоторой точки вспомогательного зеркала и попасть в фокус  $B$ . Эта точка вспомогательного зеркала также определяется из условия постоянства оптических путей и на рис. 372 обозначена  $R_3$ .

Далее, если из точки  $B$  луч падает в точку  $D$  вспомогательного зеркала, то, исходя из условия равенства путей, ему должна соответствовать некоторая точка на главном зеркале  $R_3$ .

Если продолжить аналогичную процедуру, то можно получить систему связанных точек на главном и вспомогательном зеркалах. Эти точки, как и в случае симметричной бифокальной антенны, назовем узловыми точками.

Рассмотрим теперь (рис. 372) построение промежуточных точек на главном и вспомога-

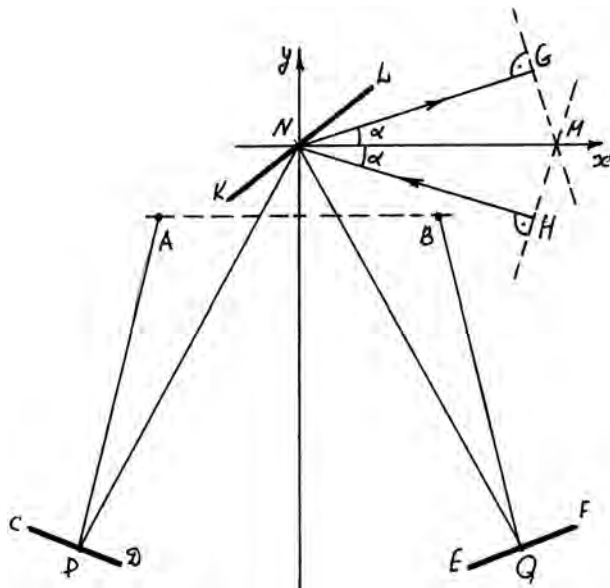


Рис. 371

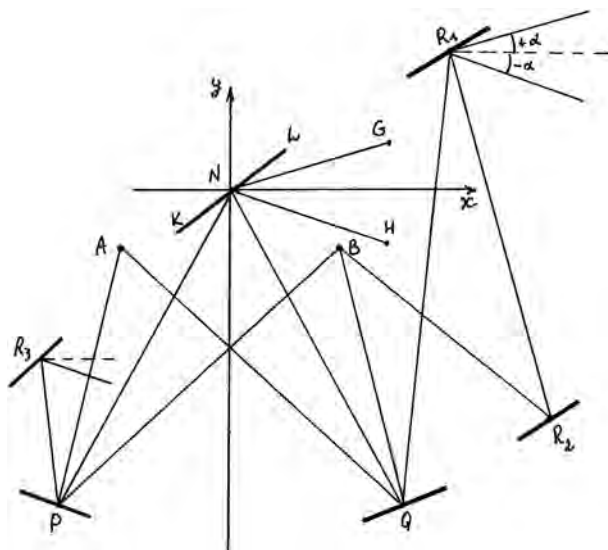


Рис. 372

ном зеркалах, например, на интервалах  $N-R_1$  и  $P-Q$  соответственно.

Установим прежде всего некоторую зависимость между направлением лучей облучателя в пределах угла  $PAQ$  и соответствующими лучами в раскрыве между  $N$  и  $R_1$ . Очевидно, эта зависимость может быть задана в форме  $y = f_0 f(Q) \sin \theta$ , где  $y$  — расстояние от луча  $GN$  до данного луча, а угол  $Q$  определяет направление соответствующего луча, выходящего из фокуса  $A$ . Величина  $f_0$  выбирается также как и в случае осесимметричных бифокальных антенн.

Исследуя апланатические антенны, убеждаешься, что удовлетворения одного лишь условия синусов оказывается недостаточным для решения всех задач, которые могут возникнуть перед разработчиком сканирующих антенн, а круговая форма характеристической кривой невольно наводит на мысль: нельзя ли как-нибудь изменить ее форму, чтобы получить новый тип антенн с еще более высокими сканирующими свойствами. Однако более или менее успешно эту задачу можно попытаться решать только для вполне конкретных задач, для которых предыдущий опыт позволяет рассчитывать на некоторый успех. Процедура получения антенн с улучшенными по сравнению с апланатами свойствами сродни процессу синтеза оптимальной системы.

Пусть имеется система, которая задана дифференциальным уравнением

$$\frac{dr}{d\varphi} = F_1[\varphi, r, f_1(\varphi), \alpha, M, d, D] \quad (100)$$

и рядом параметрических уравнений

$$\left. \begin{aligned} x &= F_2[\varphi, r, f_1(\varphi), M], \\ y &= f_1(\varphi)\sin\varphi, \\ \alpha &= f_2(y). \end{aligned} \right\} \quad (101)$$

Здесь  $r$  — радиус-вектор поверхности вспомогательного зеркала;  $f_1(\varphi)$  — радиус-вектор характеристической кривой;  $\alpha$  — угол сканирования;  $M$  — фокальный отрезок;  $\varphi$  — угол лучей источника с осью антенны;  $x, y$  — координаты поверхности главного зеркала.

Аналитически задача синтеза может быть сформулирована следующим образом. Для некоторой динамической системы, описываемой уравнениями (100) и (101) и характеризуемой показателем качества

$$\Delta L\{[dr/d\varphi, r, f(\varphi), \dots, \theta] - x^*(\varphi)\}, \quad (102)$$

обеспечить минимум, максимум или, наконец, минимакс некоторого интеграла

$$Q = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \Delta L^2 d\varphi, \quad (103)$$

который является функционалом от ряда управляющих функций

$$\left. \begin{aligned} y &= f_1(\varphi)\sin\varphi, \\ \alpha &= f_2(y), \\ x_1 &= f_3(y_1). \end{aligned} \right\} \quad (104)$$

Здесь зависимость  $y = f_1(\varphi)$  определяет форму характеристической кривой; зависимость  $\alpha = f_2(y)$  — угловая функция, определяющая направление отдельных лучей в раскрыве антенны;  $x_1 = f_3(y_1)$  определяет форму траектории перемещения облучателя (уравнение фокальной кривой).

Выбор функций (104) ограничен, а экстремум функционала ищется на некотором допустимом интервале углов

$$\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2. \quad (105)$$

I. Наиболее простая задача оптимального синтеза включает в себя создание антенны, для которой должен быть обеспечен минимум интеграла (103) для заданного угла отклонения диаграммы направленности  $\theta$ . Тогда условия задачи можно сформулировать следующим образом: найти функцию  $f_1(\varphi)$ , которая бы доставляла минимум функционалу (103) для динамической системы

$$\frac{dr}{d\varphi} = F_1[r, f_1(\varphi), \dots, \varphi], \quad x = F_2\left[r, \frac{dr}{d\varphi}, \dots, \varphi\right], \quad (106)$$

$$y = f_1(\varphi)\sin\varphi, \quad \alpha = f_2(y)$$

с ограничениями

$$\left. \begin{aligned} d_2 \leq d \leq d_1, \quad M_2 \leq M \leq M_1, \\ \varphi_2 \leq \varphi \leq \varphi_1, \quad \alpha = \alpha(\varphi) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (107)$$

Здесь, как видно из последнего соотношения (107), речь идет о монофокальной антенне с фокусом на оси.

II. Вторая задача оптимального синтеза может рассматриваться как разновидность первой: ее условие можно распространить на бифокальную антенну, заменив последнее уравнение (107) уравнением

$$\alpha = \alpha(\varphi) = \pm A.$$

III. Третья задача — минимизация функционала (103) для сектора  $\pm\theta^\circ$  при заданной траектории движения источника. Очевидно, эта задача в какой-то мере может быть решена для моноили бифокальной антенны. Тогда ограничения примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \alpha = \alpha(\varphi) = 0, \pm A, \quad d_2 \leq d \leq d_1, \quad \varphi_2 \leq \varphi \leq \varphi_1, \\ M_2 \leq M \leq M_1, \quad x_1 = f_3(y_1). \end{aligned} \right\} \quad (108)$$

IV. Четвертая задача оптимального синтеза имеет следующую формулировку: в секторе  $\pm\theta$  антенна должна иметь минимальную ошибку

(например, постоянную). Эта задача нам представляется наиболее адекватной для антенн с широкоугольным сканированием. Сформулируем ее в терминах вариационных методов.

Пусть сектор сканирования разбит на  $N$  интервалов. Тогда для каждого интервала можно записать интеграл (103):

$$\begin{aligned} Q|_{\theta/N} &= \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \Delta L^2 d\varphi, \\ Q|_{2\theta/N} &= \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \Delta L^2 d\varphi, \\ &\dots \\ Q|_{\theta} &= \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \Delta L^2 d\varphi. \end{aligned} \quad (109)$$

Здесь ограничения аналогичны системе (107), а в качестве минимизирующих функций используются следующие:

$$y = f_1(\varphi) \sin \varphi, \quad \alpha = f_2(\varphi), \quad x_1 = f_3(\varphi). \quad (110)$$

V. В качестве следующей задачи можно рассмотреть метод построения антенн, подобных бифокальным. Как известно, бифокальные антенны рассчитываются только для одного сечения, содержащего ось антенны и оба фокуса. Аберрации в остальных сечениях (астигматизм) никак не контролируются; в связи с этим рационально поставить более общую задачу. А именно, найти такие управляющие функции  $\alpha = \alpha(\varphi)$ ,  $y = f(\varphi) \sin \varphi$ , которые давали бы минимум функционалу для двух углов сканирования. При этом точной сходимости в меридиональном сечении (как у бифокальных антенн) не будет, но аберрации в целом будут уменьшены за счет компромисса между аберрациями в разных плоскостях.

Сформулированные здесь задачи оптимального синтеза, по-видимому, не исчерпывают всех возможных ситуаций, которые могут возникнуть при разработке сканирующих антенн. Однако эти задачи достаточно универсальны.

Ранее были исследованы апланатические антенны, фокус которых совпадает с центром кривизны характеристической кривой — окружности. Была рассмотрена зависимость профилей антенны от отношения  $f/d$ , показан процесс выбора оптимального фокуса волновых фронтов. Теперь задача состоит в получении антенны с меньшими искажениями по сравнению с апланатическими антеннами — суперапланаты. Для обеспечения сравнимости результатов будем полагать, что рассматриваются антенны одинакового диаметра  $D$ , одинакового осевого размера  $d$ , одинакового фокусного расстояния  $f_0$  и с одинаковым фокальным отрезком  $M$ . Таким обра-

зом, антенны, среди которых ищется экземпляр с минимальными искажениями для всех углов сканирования, отличаются друг от друга только формой характеристической кривой.

Исследование будет включать в себя следующие этапы:

1. Исследование волновых фронтов в режиме приема в исходной антенне;
2. Исследование волновых фронтов в режиме приема при вариации характеристической кривой.

На этих этапах искажения будут оцениваться по отклонению реального волнового фронта от некоторой эталонной сферы.

На рис. 373, *a* показана схема исходной апланатической антенны, у которой центр характеристической кривой (окружности) совпадает с фокусом. На рис. 373, *б*, в показаны схемы антенн, у которых характеристическая кривая — также окружность, но ее центр не совпадает с фокусом антенны. Будем полагать, что у всех рассматриваемых антенн одинаковое расстояние от фокуса  $F$  до характеристической кривой вдоль оси, т. е. до точки  $A$ . Это расстояние является осевым фокусным расстоянием ( $f_0$ ) антенны, и оно одинаково для всех рассматриваемых антенн, изменится только радиус характеристической кривой таким образом, что выполняется равенство  $f_0 = R \pm a = \text{const}$ .

На рис. 374 представлена серия волновых фронтов в меридиональном сечении в области сходящегося пучка, т. е. в области фокуса. Кривая *I* соответствует апланатической антенне диаметром 600 мм с  $R = f_0 = 400$  мм при  $a = 0$  (рис. 373, *a*). Кривые *II* и *III* соответствуют окружностям, центры которых смещены влево от главного зеркала ( $a > 0$ , рис. 373, *б*). Кривые *IV* и *V* соответствуют окружностям, центры которых смещены от фокуса в сторону вспомогательного зеркала ( $a < 0$ , рис. 373, *в*).

На рис. 373 показана только область наибольших искажений волнового фронта в обла-

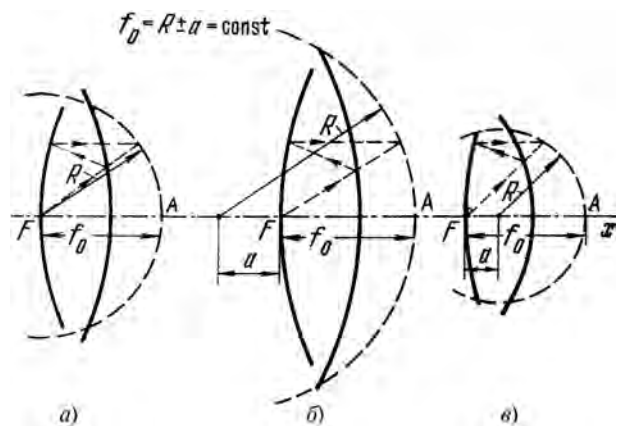


Рис. 373

ти сходящегося пучка. Искажения этих фронтов оцениваются по отклонению полученных реальных волновых фронтов от некоторой эталонной сферы. Видно, что искажения уменьшаются при  $a < 0$  (кривая IV) и возрастают по сравнению с апланатической антенной при  $a > 0$  (кривая III). Общий вывод, который может быть сделан на основании приведенных рассуждений, состоит в том, что свойства двухзеркальных антенн определяются их характеристической кривой.

Наиболее радикальный путь создания сканирующих антенн, превосходящих по своим параметрам апланатические антенны, состоит в оптимизации формы характеристической кривой, которая определяет свойства антенн.

Расчет таких антенн при  $f = \text{const}$  подробно рассмотрен ранее, поэтому запишем только основные уравнения, с помощью которых ведется расчет профилей зеркал.

Для определения поверхностей типа Кассегрена система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{aligned} r + l + s &= 3d, \\ r \sin \varphi + l \sin 2\gamma &= y, \\ r \cos \varphi - l \cos 2\gamma &= x, \\ 2\gamma &= 2\beta - \varphi, \\ y &= f(\varphi) \sin \varphi, \\ \frac{1}{r} \frac{dr}{d\varphi} &= \text{tg} \beta. \end{aligned}$$

Преобразуя эти выражения получим:

$$\frac{dr}{d\varphi} = \frac{r \left[ f \sin \varphi + 2(d-r) \text{tg} \frac{\varphi}{2} \right]}{2 \left( d - f \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right)}.$$

Поверхность зеркал асимметричных антенн типа Грегори описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} r + l + s &= 3d, \\ -r \sin \varphi + l \sin 2\gamma &= y, \\ r \cos \varphi - l \cos 2\gamma &= x, \\ 2\gamma &= 2\beta + \varphi, \\ y &= f(\varphi) \sin \varphi, \\ \frac{1}{r} \frac{dr}{d\varphi} &= -\text{tg} \beta, \\ \frac{dr}{d\varphi} &= \frac{r \left[ 2(d-r) \text{tg} \frac{\varphi}{2} - f \sin \varphi \right]}{2 \left( d + f \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right)}, \end{aligned}$$

где  $r$  — радиус-вектор поверхности вспомогательного зеркала;

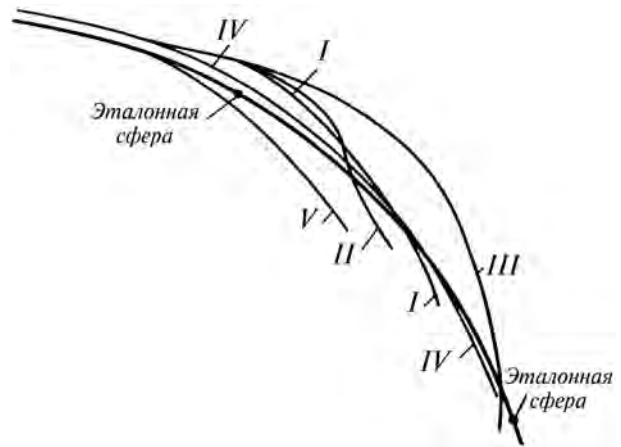


Рис. 374

$f = f(\varphi)$  — радиус-вектор характеристической кривой;

$\varphi$  — угол лучей источника и осью антенны;  
 $x, y$  — координаты поверхности главного зеркала.

В общем случае фокусное расстояние  $f \neq \text{const}$  и имеет вид некоторой функции от угла  $\varphi$ . В этом случае решение дифференциальных уравнений в квадратурах становится невозможным, поэтому расчет профилей зеркал сводится к решению вышеприведенных дифференциальных уравнений численным методом.

В данном случае интегрирование дифференциальных уравнений производится по методу Рунге—Кутты четвертого порядка.

Запишем дифференциальное уравнение в общем виде:

$$\frac{dr}{d\varphi} = f(\varphi, r).$$

Суть этого метода заключается в следующем:

— интегрирование уравнений сводится к поиску такой функции  $r(\varphi)$ , которая удовлетворяла бы дифференциальным уравнениям, т. е. подстановка ее в уравнения превращала бы эти уравнения в тождество. Таких функций  $r(\varphi)$  может быть бесконечное множество. Выбор из множества возможных решений одного определенного производится указанием одной из точек, принадлежащих решению.

Координаты этой точки могут быть определены граничным условием:

$$\varphi = 0; r = d.$$

Это граничное условие выполняется для обоих уравнений.

Пусть интегрирование ведется с шагом  $h$ . За шаг интегрирования  $h$  принято изменение угла  $\varphi$ . Погрешность вычисления радиуса-вектора вспомогательного зеркала  $r$  тем меньше, чем меньше шаг интегрирования, поэтому интегрирование ведется с  $\beta = 0,01^\circ$ .

В методе Рунге—Кутта расчет на одном шаге интегрирования предусматривает вычисление четырех приращений.

$$\Delta_1^{(i+1)} = hf(\varphi^{(i)}, r^{(i)}),$$

$$\Delta_2^{(i+1)} = hf(\varphi^{(i)} + h/2, r^{(i)} + \Delta_1^{(i+1)}/2),$$

$$\Delta_3^{(i+1)} = hf(\varphi^{(i)} + h/2, r^{(i)} + \Delta_2^{(i+1)}/2),$$

$$\Delta_4^{(i+1)} = hf(\varphi^{(i)} + h, r^{(i)} + \Delta_3^{(i+1)}).$$

Приращение  $\Delta_1^{(i+1)}$  вычисляется через производную в точке  $(\varphi^{(i)}, r^{(i)})$ ; приращение  $\Delta_2^{(i+1)}$  вычисляется через производную в точке  $(\varphi^{(i)} + h/2, r^{(i)} + \Delta_1^{(i+1)}/2)$ ; приращение  $\Delta_3^{(i+1)}$  — через про-

изводную в точке  $(\varphi^{(i)} + h/2, r^{(i)} + \Delta_2^{(i+1)}/2)$  и приращение  $\Delta_4^{(i+1)}$  через производную в точке  $(\varphi^{(i)} + h, r^{(i)} + \Delta_3^{(i+1)})$ . Так как при определении приращений  $\Delta_2^{(i+1)}$  и  $\Delta_3^{(i+1)}$  используются точки в середине шага интегрирования, эти приращения считаются более точными и при усреднении приращений они берутся с весовым коэффициентом, равным 2:

$$r^{(i+1)} = r^{(i)} + \frac{1}{6}(\Delta_1^{(i+1)} + 2\Delta_2^{(i+1)} + 2\Delta_3^{(i+1)} + \Delta_4^{(i+1)}).$$

По вышеприведенным формулам вычисляется радиус вспомогательного зеркала при определенном значении угла  $\varphi$ .

Затем по формулам, приведенным ранее, определяются координаты главного зеркала.

## КОММУТАЦИОННЫЕ И МНОГОЛУЧЕВЫЕ АНТЕННЫ — ОПТИМИЗАЦИЯ

В случае, если ширина диаграммы направленности антенны спутника меньше, чем угол зрения со спутника на зону связи на поверхности Земли, то необходимо использовать тот или иной метод последовательного перенацеливания узкой ДН антенны, неподвижной относительно спутника, в различные точки на земной поверхности в пределах зоны связи. Серию таких перенацеливаемых лучей можно получить с помощью системы отдельных облучателей зеркальной антенны, каждому из которых соответствует своя ДН в пределах зоны связи.

Необходимость обеспечения устойчивой связи в пределах всей зоны связи требует поддержания постоянного и высокого коэффициента усиления бортовой антенны в пределах зоны связи. Использование антенн с узкими лучами на борту выдвинуло на первый план трудно реализуемое требование предельного уменьшения углового разноса парциальных лучей, поскольку наличие у ДН бортовой антенны крутых скатов приводит к значительному перепаду мощности сигналов, излучаемых непосредственно в направлении оси ДН и в направлении, образующем некоторый угол с осью. Ранее было показано, что в параболических антеннах парциальные лучи пересекаются на низком уровне — вплоть до  $-10$  дБ, что может привести к полному нарушению связи в направлениях, близких к направлению пересечения парциальных лучей.

В данном параграфе описывается новый тип антенны, у которой имеется возможность существенного повышения уровня пересечения парциальных лучей.

На рис. 375 показаны две соседние ДН, построенные в прямоугольных координатах по напряженности поля ( $E/E_{\max} - \alpha$ ). Уровень  $(E/E_{\max})_{\text{пер}}$  соответствует уровню поля, на котором пересекаются данные ДН. При этом может оказаться, что в направлениях  $\alpha = 0$  и  $\alpha = \alpha_{\max}$  величина напряженности поля будет достаточной для обеспечения связи, а в направлении угла  $\alpha = \alpha_{\min}$  связь может оказаться неустойчивой из-за недопустимого падения напряженности поля.

Очевидно, что вариации напряженности поля в пределах зоны связи будут тем меньше, чем выше уровень пересечения соседних ДН, т. е. чем меньше будет угол между осями соседних ДН при данной ширине диаграммы направленности антенны.

Минимальный угол между осями двух соседних ДН данной антенны имеет место в том случае, когда запитываются два облучателя, расположенные вплотную друг к другу на фокальной поверхности и расстояние между центрами раскрывов облучателей минимально. Величина этого угла зависит от расстояния между центрами раскрывов и величины фокусного расстояния: чем больше фокусное расстояние при фиксированном расстоянии между центрами раскрывов облучателей, тем выше уровень пересечения соседних лучей. Поэтому нужно стремиться к тому, чтобы фокусное расстояние антенны было максимально, а расстояние между центрами раскрывов — минимально. При этом предполагается, что размеры раскрыва облучателя каждый раз таковы, что обеспечивается максимальный КНД антенны в целом.

Чтобы уяснить недостатки известных антенн, проще всего рассмотреть их на примере параболических антенн, поскольку тот же самый эффект имеет место и в двухзеркальных антеннах, но анализ параболических антенн существенно проще.

На рис. 376 представлены схемы двух параболических антенн одинакового диаметра, но с разными фокусными расстояниями  $f_1 < f_2$ . В обеих антеннах облучатели вынесены из фокуса  $F$  в точку  $F_1$ , положение которой выбрано так, что антенны отклоняются на один и тот же угол  $\alpha$ . Видно, что при одном и том же угле отклонения вынос облучателя из фокуса больше

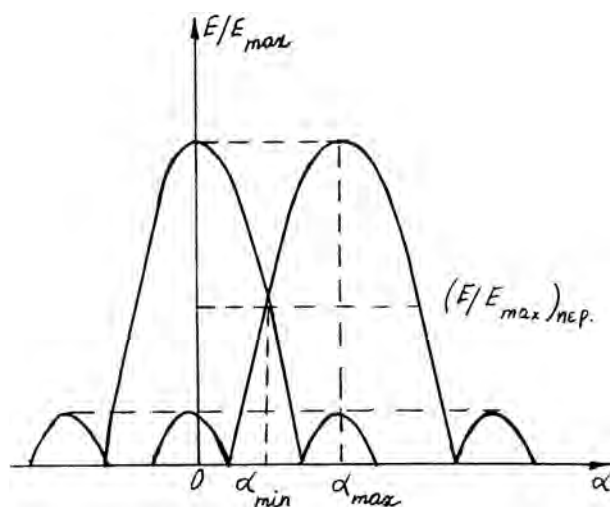


Рис. 375

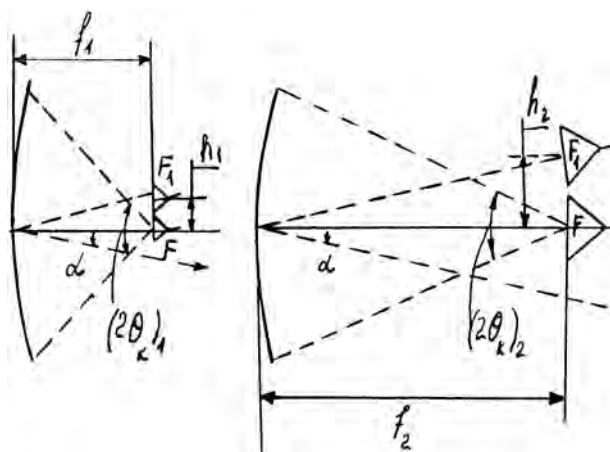


Рис. 376

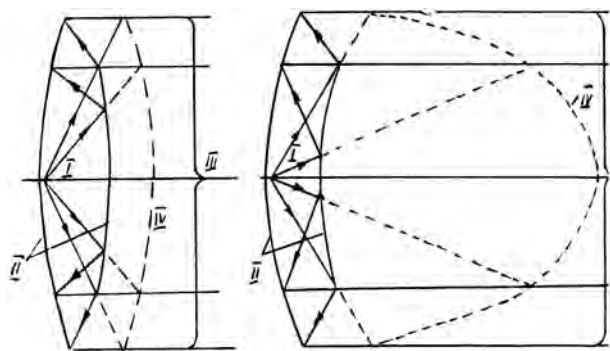


Рис. 377

во второй антенне ( $h_2 > h_1$ ). Вместе с тем видно, что апертурный угол второй антенны ( $2\theta_{k2}$ ) меньше, чем ( $2\theta_{k1}$ ), поэтому и облучатель во второй антенне имеет большие размеры раскрыва.

Таким образом, увеличение фокусного расстояния в параболической антенне автоматически приводит к увеличению размеров раскрыва облучателя и увеличению расстояния между центрами их раскрывов при расположении их вплотную друг к другу. Поэтому увеличение фокусного расстояния параболической антенны не может привести к увеличению уровня пересечения ее диаграмм направленности. Этот уровень обычно составляет  $-7 \dots -9$  дБ от поля в направлении максимума диаграммы направленности, т. е. в направлении между осями ДН излучаемая мощность существенно уменьшается, что может оказаться неприемлемым, т. к. такое уменьшение излучаемой мощности может привести к нарушению связи. Этот недостаток всех известных антенн обычно компенсируется либо существенным увеличением мощности передатчика/чувствительности приемника/, либо использованием второй антенны, лучи которой направлены в промежутки между лучами первой антенны.

Для обеспечения устойчивой связи в широкой зоне необходимо добиться минимального перепада коэффициента усиления в пределах зоны связи. Поставленная цель достигается следующим об-

разом: поверхность главного и вспомогательного зеркал выполняется таким образом, что существенно возрастает уровень пересечения соседних ДН за счет того, что характеристическая кривая антенны задается соответствующим образом.

Рассмотрим принцип действия антенны, определив понятие характеристической кривой (рис. 377), по которой пересекаются продолжения лучей облучателя и соответствующие им лучи на выходе антенны. На рис. 377 даны следующие обозначения: 1 — лучи облучателя, 2 — двухзеркальная антенна, 3 — пучок параллельных лучей на выходе из антенны, 4 — характеристическая кривая, радиус-вектор которой в точке на оси антенны является ее фокусным расстоянием, а угол  $2\theta_k$  является апертурным углом антенны. На рис. 378 представлена схема двухзеркальной антенны, имеющей такой же радиус раскрыва и такой же апертурный угол как и у антенны, изображенной на рис. 377, но отличающаяся величиной фокусного расстояния и формой характеристической кривой. Форма характеристической кривой этой антенны задана выражением

$$\rho = B + A \cos n \left( \frac{\pi \theta}{2\theta_k} \right),$$

где  $\rho$  — радиус-вектор характеристической кривой,  $\theta$  — текущий угол,

$\theta_k$  — крайний угол, определяющий ширину ДН и размеры раскрыва облучателя,

$\rho = B$  при  $\theta = \theta_k$ ;  $B + A = f =$  фокусному расстоянию антенн.

Постоянные  $B$ ,  $A$ ,  $\theta_k$  показаны на рис. 378; показатель степени  $n$  может быть задан произвольно. Использование именно такой формы характеристической кривой позволяет независимо задавать апертурный угол  $2\theta_k$  и величину фокусного расстояния; при данном апертурном угле  $2\theta_k$  величина фокусного расстояния  $f = B + A$  выбирается по желанию: исходя из необходимого уровня соседних диаграмм направленности.

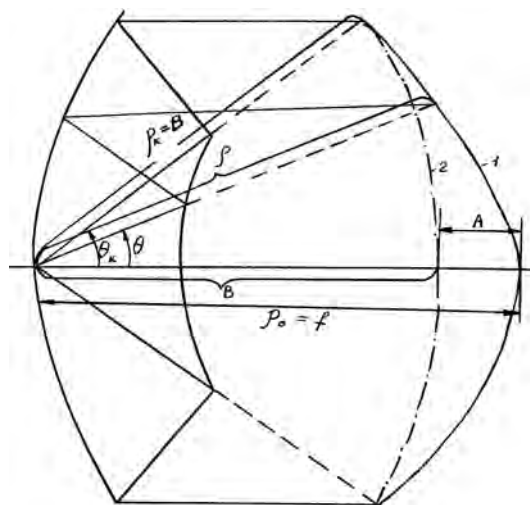


Рис. 378



## АПЛАНАТ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ УЧАСТКАМИ НА ВСПОМОГАТЕЛЬНОМ ЗЕРКАЛЕ

Рассмотрим процесс сканирования в двухзеркальной антенне. Как известно, отклонение диаграммы направленности (ДН) в таких антеннах, т. е. сканирование, происходит вследствие того, что облучатель или эквивалентный фазовый центр излучения выносится из точки фокуса  $F$ . При этом, чем дальше от фокуса будет вынесен облучатель, тем на больший угол отклонится диаграмма направленности. Предположим, что антенна должна обеспечивать сканирование ДН в секторе углов  $\pm \alpha_{\max}$ , где  $\alpha_{\max}$  — угол наибольшего отклонения ДН в одну сторону от оси антенны.

На рис. 379 первоначально показан ход лучей в двухзеркальной антенне при расположении облучателя в фокусе  $F$  (угол сканирования равен нулю). Здесь  $A$  и  $B$  — крайние точки на вспомогательном зеркале,  $D$  и  $C$  — соответствующие им крайние точки на главном зеркале. На рис. 380 показан ход лучей в той же антенне при сканировании, т. е. при выносе облучателя из фокуса  $F$  в точку  $F_1$ , что соответствует отклонению ДН на угол  $\alpha_{\max}$ . Луч, падающий из точки  $F_1$  в точку  $A$  на краю вспомогательного зеркала уже не может попасть в точку  $D$  — крайнюю точку главного зеркала. Этот луч попадает в некоторую точку  $G$ . Видно, что облучаемая часть главного зеркала уменьшилась на  $\Delta$ . Чем больше угол сканирования, тем сильнее недооблучается главное зеркало. Таким образом, недостаток известных апланатических антенн состоит в том, что при сканировании невозможно обеспечить облучение всей поверхности главного зеркала.

Между тем необходимо, чтобы в процессе сканирования главное зеркало каждый раз облучалось полностью, а не так, как это изображено на рис. 380, поскольку именно главное зеркало определяет ширину диаграммы направленности и КДН антенны.

Недооблучение главного зеркала приводит к расширению ДН и уменьшению КНД антенны. Для компенсации этого эффекта в известных антеннах приходится соответственно увеличивать мощность передатчика (чувствительность приемника) или вместо одной антенны использовать две отдельные антенны, каждая из которых обеспечивает сканирование во вдвое меньше секторе углов. В предлагаемой антенне полное облучение главного зеркала для всех углов сканирования достигается за счет того, что энергия

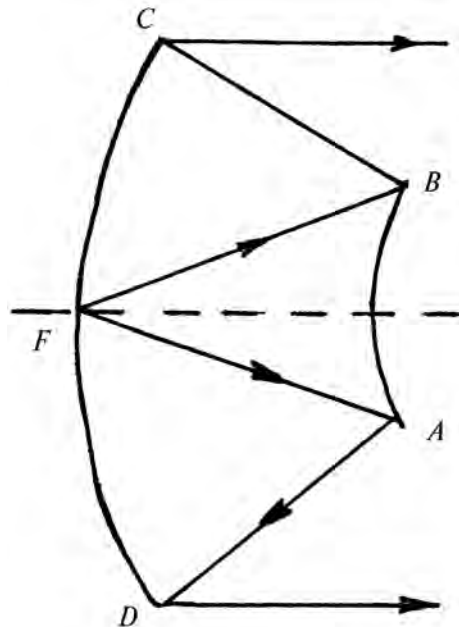


Рис. 379

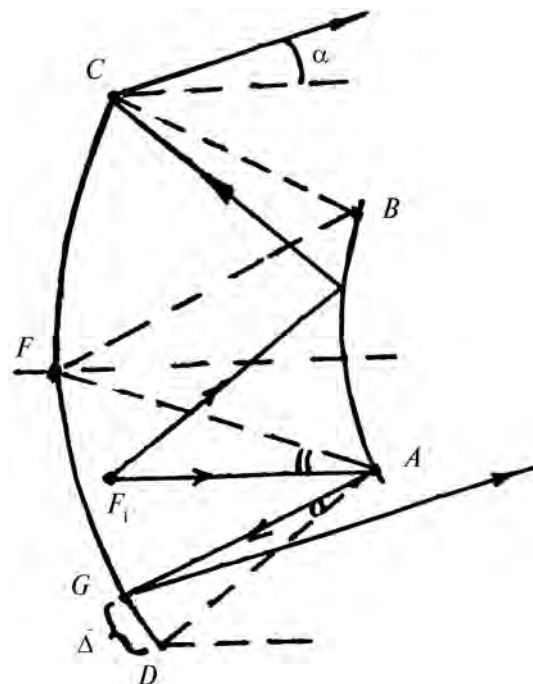


Рис. 380

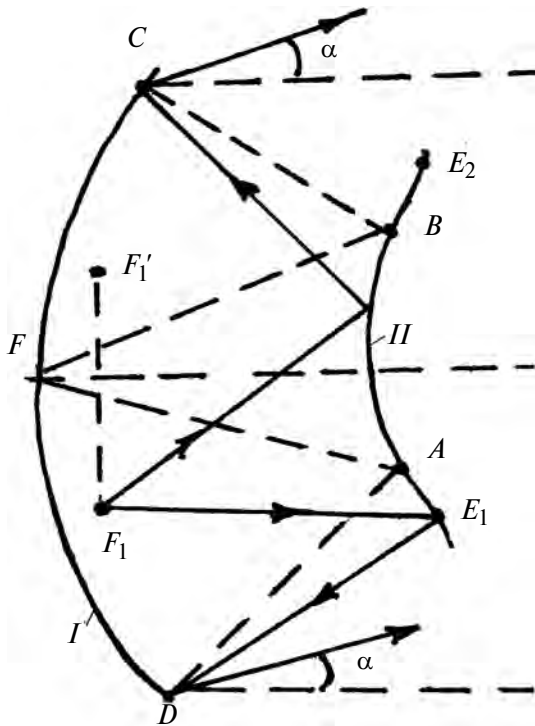


Рис. 381

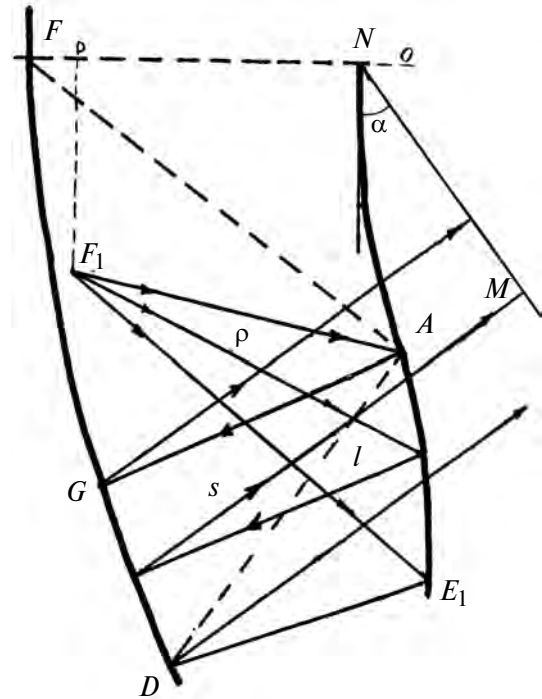


Рис. 382

облучателя отражается в сторону главного зеркала дополнительными частями поверхности вспомогательного зеркала, которые не используются при осевом положении ДН.

Рассмотрим рис. 381, на котором представлено сечение предлагаемой антенны. Здесь  $I$  — главное зеркало;  $AB$  — участок вспомогательного зеркала  $II$ , необходимый для облучения всей поверхности главного зеркала при осевом положении диаграммы направленности, т. е. при расположении облучателя в фокусе  $F$ ;  $AE_1$  — участок вспомогательного зеркала, необходимый для облучения всей поверхности главного зеркала при отклонении диаграммы направленности на край сектора сканирования при расположении облучателя в точке  $F_1$ . Следует подчеркнуть, что участок  $AE_1$  (и симметричный ему участок  $BE_2$  вспомогательного зеркала) нужен только для облучения главного зеркала при расположении облучателя на краю сектора сканирования: при осевом положении диаграммы он не используется. В предлагаемой антенне форма участка  $AE_1$  ( $BE_2$ ) специально рассчитывается таким образом, что после отражения от этого участка, а затем от главного зеркала, получается неискаженная диаграмма направленности в соответствующих направлениях. Расчет участков  $AE_1$  и  $BE_2$

на вспомогательном зеркале производится при расположении облучателей в точке  $F$ . Форма и размеры дополнительного участка вспомогательного зеркала определяются из условия (рис. 382):

$$\rho + l + s = C,$$

где  $\rho$  — радиус-вектор поверхности дополнительного участка относительно фокуса  $F_1$ , соответствующего отклонению ДН на угол  $\alpha_{\max}$ , т. е. на край сектора сканирования;

$l$  — расстояние от вспомогательного зеркала до главного зеркала вдоль лучей;

$s$  — расстояние вдоль луча от главного зеркала до плоского фронта  $MN$ , наклоненного на тот же угол  $\alpha$  к вертикали;

$C$  — константа.

В трехмерной антенне, полученной вращением сечения, изображенного на рис. 383 вокруг оси  $OO$ , будет главный фокус на оси, а также целый частичный кольцевой фокус диаметром  $2F_1P$ . Если облучатели располагать на этом кольце, то главное зеркало будет облучаться почти полностью, а диаграмма направленности на краю сектора сканирования в такой антенне за счет использования дополнительных участков вспомогательного зеркала будет искажаться гораздо меньше, чем в обычных апланатических антеннах.

## СФЕРИЧЕСКИЕ ЗЕРКАЛЬНЫЕ АНТЕННЫ

Сферические зеркальные антенны и их различные модификации находят применение в качестве сканирующих антенн, поскольку их диаграмма направленности при сканировании остается практически неизменной в большом секторе углов.

На рис. 384, а показан ход лучей, падающих параллельным пучком на поверхность сферического зеркала (I) в режиме приема. Видно, что эти лучи после отражения от зеркала не собираются в одной точке (фокусе антенны). Касательная к отраженным лучам (II) есть каустика, форму которой необходимо учитывать при разработке сферических антенн любой модификации.

В отличие от параболических антенн, в раскрыве сферического зеркала с точечным облуча-

телем в режиме передачи невозможно получить плоский фронт волны: зеркало обладает сферической аберрацией. Однако можно так подобрать диаграмму направленности и положение облучателя, что искажения диаграммы антенны не будут превышать допустимой величины.

При анализе сферического зеркала достаточно рассмотреть только одно сечение, проходящее через ось симметрии антенны. Полученные результаты будут справедливы и для остальных сечений антенны в силу ее осевой симметрии.

Расчет сферического зеркала обычно состоит в выборе оптимального расположения облучателя и его диаграммы. Если расположить плоскость раскрыва на расстоянии  $h$  от вершины зеркала (рис. 384, б) и считать, что радиус сферической поверхности равен 1, то нормированная разность оптических путей произвольного и центрального лучей будет равна

$$\Delta l = \sqrt{1 + d^2 - 2d\sqrt{1 - x^2}} \left[ 1 + \frac{\sqrt{1 - x^2} + h - 1}{\sqrt{1 - x^2} + 2dx^2 - d} \right] - 1 - h + d,$$

где  $d$  — расстояние от центра сферы до облучателя,  $x$  — координата точки на поверхности отражателя,  $x'$  — соответствующая координата точки в раскрыве:

$$x' = x \left[ 1 - (1 - h - \sqrt{1 - x^2}) \frac{1 - 2d\sqrt{1 - x^2}}{d - \sqrt{1 - x^2}} \right].$$

На рис. 385 приведены графики  $\Delta l = f(x')$  при относительной глубине зеркала  $h = 0,4$ . Видно, что минимальная величина максимальной разности  $\Delta l$  соответствует расположению источника на 0,5—0,6 от центра сферы. Это расстояние является оптимальным для данной глубины сферического зеркала. На рис. 386 показана зависимость  $d_{\text{опт}}$  от глубины зеркала. Здесь же дана зависимость  $\Delta l_{\text{max}}$  на краю раскрыва для оптимального расстояния  $d_{\text{опт}}$ .

Если считать, что допустимая величина разности фаз на краю раскрыва составляет  $\pi/2$ , то максимальный радиус раскрыва антенны составит

$$R_{\text{max}} = R_{\text{сф}} \sqrt[4]{\lambda / R_{\text{сф}}},$$

где  $\lambda$  — длина рабочей волны,  $R_{\text{сф}}$  — радиус сферической поверхности. Очевидно, что увеличе-

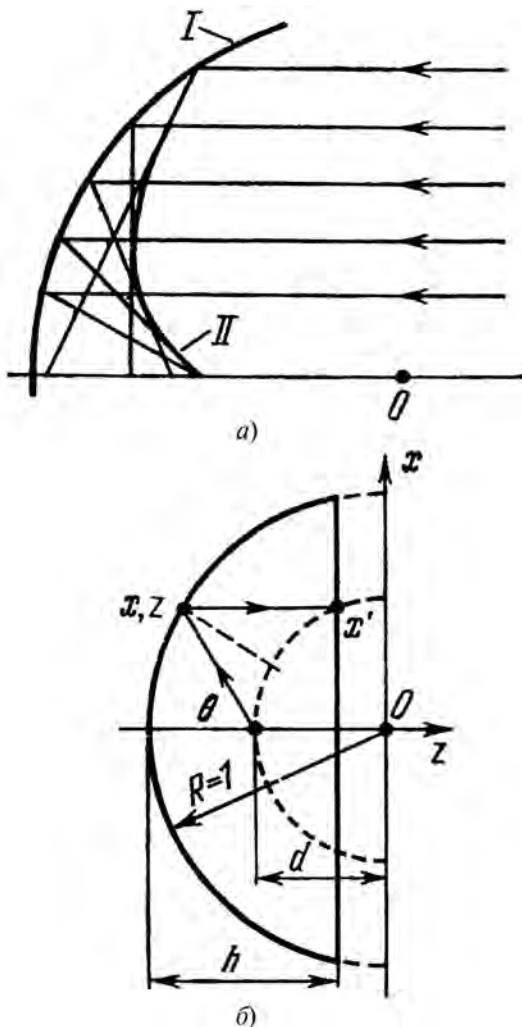


Рис. 384

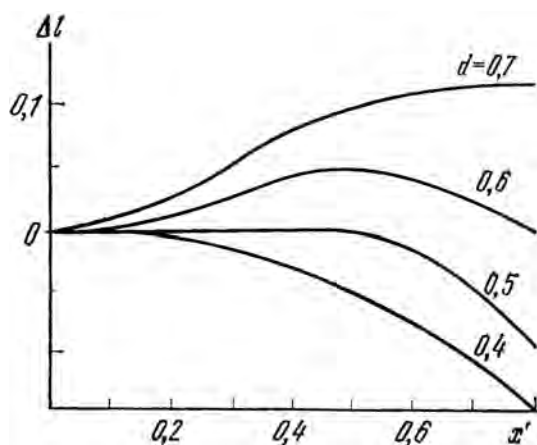


Рис. 385

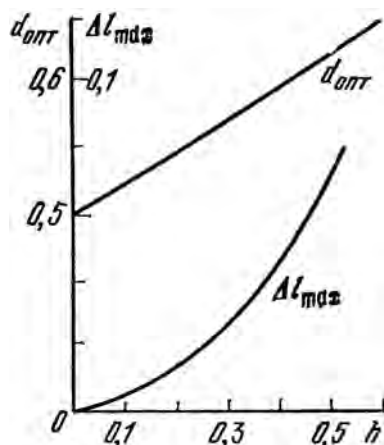


Рис. 386

ние  $R_{\max}$  возможно только за счет использования мелких зеркал с большим радиусом кривизны.

Для приближенного расчета диаграммы направленности сферического зеркала можно его отождествить с обычным параболическим зерка-

лом с диаметром раскрыва  $2R_{\max}$ . При этом поле в раскрыве можно вычислить по формуле

$$A(x) = A(\theta)/\rho,$$

где  $\rho$  — радиус-вектор поверхности сферы относительно точки расположения облучателя,  $A(\theta)$  — диаграмма облучателя по напряженности поля. Аппроксимируя поле в раскрыве функцией

$$f = x/R_{\max} = 1 - (1 - \Delta)(x/R_{\max})^2,$$

где  $\Delta$  — поле на краю раскрыва, можно считать диаграмму направленности по формуле

$$f(\theta) = \frac{\Delta J_1(u)}{u} - \left[ 2(1 - \Delta) \frac{\Delta J_2(u)}{u^2} \right];$$

здесь  $u = \frac{2\pi}{\lambda} R_{\max} \sin \theta$ .

Необходимо отметить некоторые особенности расчета сферических антенн при сканировании. Для сохранения формы диаграммы направленности антенны при сканировании необходимо облучатель  $I$  перемещать по дуге окружности  $\Pi$ , центр которой совпадает с центром  $O$  сферической поверхности (рис. 384). При этом облучаемый раскрыв сферической поверхности  $2R_{\max}$  определяется величиной допустимых искажений на его краю и полный раскрыв антенны должен быть больше, чем облучаемый: соотношение облучаемого раскрыва и полного раскрыва определяется необходимым сектором. Из рис. 384 видно, что при ширине диаграммы направленности облучателя  $2\theta_k$  порядка  $90^\circ$  и полусферическом зеркале может быть обеспечено сканирование в секторе порядка  $100^\circ$ . Уменьшая ширину диаграммы облучателя, можно увеличить сектор сканирования до  $110-140^\circ$ .

## ДВУХЗЕРКАЛЬНЫЕ СФЕРИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ С КОРРЕКТИРУЮЩИМ ЗЕРКАЛОМ

Эти антенны находят применение в тех случаях, когда не требуется быстрого сканирования, например в радиоастрономии.

Второе зеркало в сферической антенне является корректирующим — оно исправляет сферическую абберацию главного зеркала. При этом корректирующее зеркало может быть либо вогнутым, либо выпуклым в зависимости от места его расположения относительно каустики сферического зеркала. На рис. 387, *a* показана фокальная область зеркала, причем точка *A* соответствует крайней правой точке пересечения луча, отраженного от сферы, с горизонтальной осью.

Вспомогательное корректирующее зеркало может быть построено по методу касательных (усредненных касательных) или рассчитано аналитически. При этом такое зеркало может находиться правее или левее каустики — может проходить либо через точку *B* (зеркало *II*), либо через точку *C* (зеркало *I*). Точки *B* и *C* взяты на одном и том же луче, а облучатель располагается в точке *D*. При построении зеркала типа *I* или *II* необходимо учитывать, что его поверхность не должна пересекать каустику, так как в этом случае поверхность зеркала будет претерпевать излом: из вогнутого зеркала скачком превращается в выпуклое или наоборот.

Аналитический способ расчета корректирующего зеркала базируется на методе волновых фронтов. Пусть фазовый центр источника *D* на-

ходится на расстоянии *d* от центра сферы *O* (рис. 387, *б*), а вершина корректирующего зеркала — на расстоянии *q* от центра сферы. Рассмотрим работу антенны в режиме приема, когда на сферическое зеркало падает плоский фронт волны. Фронт отраженной волны (*Y*) может быть найден из следующего соотношения:

$$Y = y_x x_0 + y_y y_0,$$

где

$$\begin{aligned} y_x &= 1 - 2\cos^2\theta(1 - \cos\theta), \\ y_y &= \sin\theta - \sin 2\theta(1 - \cos\theta), \end{aligned}$$

$x_0$  и  $y_0$  — единичные орты в прямоугольной системе координат, причем предполагается, что радиус поверхности сферического зеркала равен 1.

Поскольку облучатель должен создавать сферический фронт волны, то его уравнение можно записать так:

$$X = dx_0,$$

предполагая, что сферический фронт волны как бы стянут в точку, где расположен облучатель.

Единичную нормаль к поверхности фронта *Y* можно задать в следующем виде:

$$\xi_y = -x_0 \cos 2\theta - y_0 \sin 2\theta.$$

Очевидно, корректирующее зеркало должно преобразовывать фронт *X* в сферический фронт *Y*,

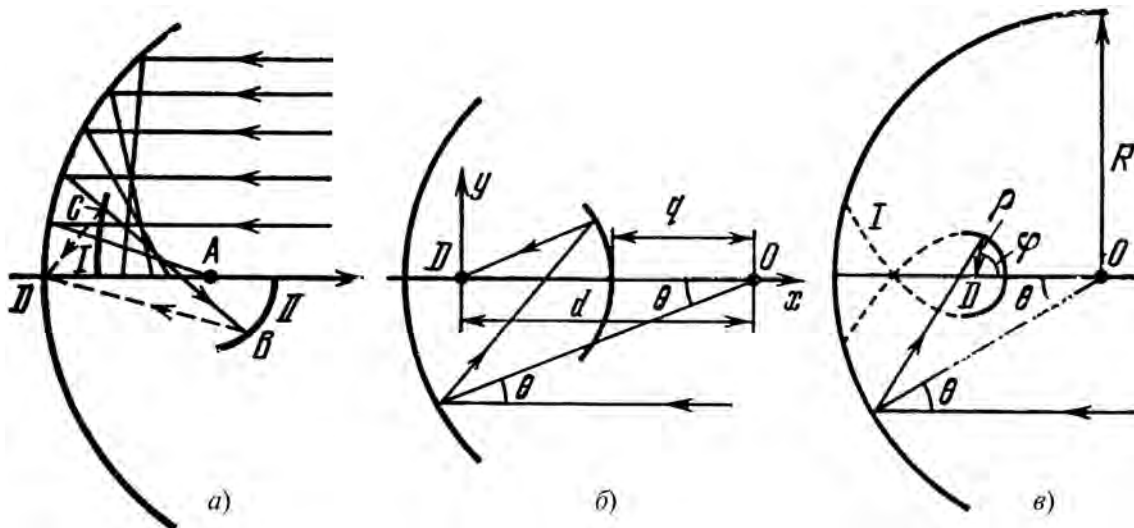


Рис. 387

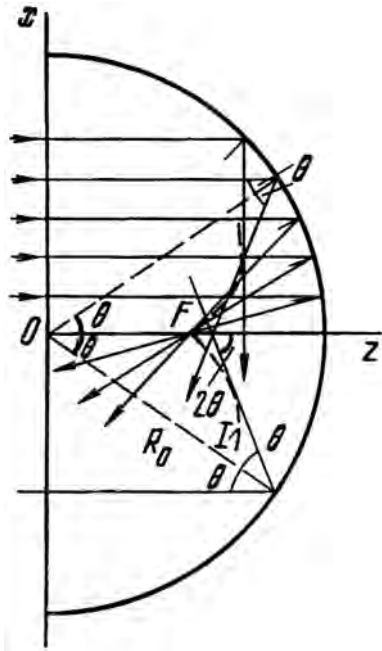


Рис. 388

т. е. уравнение зеркала должно удовлетворять как уравнению для  $X$ , так и уравнению для  $Y$ .

Решая совместно эти соотношения, получим уравнение профиля корректирующего зеркала

$$\mathbf{R}_M = R_{xM}\mathbf{x}_0 + R_{yM}\mathbf{y}_0,$$

где

$$R_{xM} = y_x - P \cos 2\theta, \quad R_{yM} = y_y - P \sin 2\theta,$$

$$P = \frac{\Pi^2 - [(y_x - d)^2 + y_y]}{2[\Pi - \cos 2\theta(y_x - d) - \sin 2\theta y_y]}.$$

Здесь  $\Pi = 1 - 2q + d$  — длина оптического пути вдоль луча от фронта  $Y$  до фронта  $X$ ,  $R_{xM}$  —  $x$ -я координата точки на корректирующем зеркале,  $R_{yM}$  —  $y$ -я координата на этом зеркале,  $y_x$  —  $x$ -я координата точки на отраженном фронте,  $y_y$  —  $y$ -я координата на этом фронте.

Уравнение корректирующего зеркала может быть записано в полярных координатах  $\rho$  и  $\varphi$  относительно точки  $D$  (рис. 387, в):

$$\varphi = 2\theta + 2 \arctg f(\theta),$$

$$\rho = \frac{1}{2} R (\sin \theta - C \sin 2\theta) \left( f(\theta) + \frac{1}{f(\theta)} \right),$$

где

$$f(\theta) = (\sin \theta - C \sin 2\theta) / Q - 2 \cos \theta + C \cos 2\theta.$$

Величина  $Q$  является произвольной постоянной, которую можно подобрать так, чтобы получить оптимальные характеристики антенны. Рассчитанная таким образом кривая  $I$  показана на рис. 387, в. Очевидно, что только часть этой

кривой может быть использована для образования корректирующего зеркала.

Обратимся теперь к более детальному рассмотрению двухзеркальной антенны с корректирующим вспомогательным зеркалом. Схема одиночного сферического зеркала представлена на рис. 388. Здесь  $O$  — центр сферической поверхности,  $I$  — каустика,  $F$  — парааксиальный фокус ( $OF = 0,5R_0$ ).

Корректирующее зеркало может быть выполнено как по схеме Кассегрена, так и по схеме Грегори (рис. 389 и 390 соответственно). На рис. 389 в точке  $P$  располагается фокус антенны, в точке  $F$  — парааксиальный фокус, цифрой  $I$  обозначено корректирующее зеркало.

Проанализируем влияние параметров антенны на ее свойства, такие, как КИП, эффективность использования апертуры при сканировании, уровень боковых лепестков, шумовая температура и т. д.

Легко видеть, что размеры корректирующего зеркала ограничены. Так, зеркало в схеме Грегори не может пересекать каустики, иначе некоторые лучи будут отражаться противоположной стороной корректирующего зеркала, т. е. произойдет излом его профиля. В схеме Кассегрена корректирующее зеркало расположено в области перед каустикой, где лучи не пересекаются, и поэтому имеется возможность корректировать

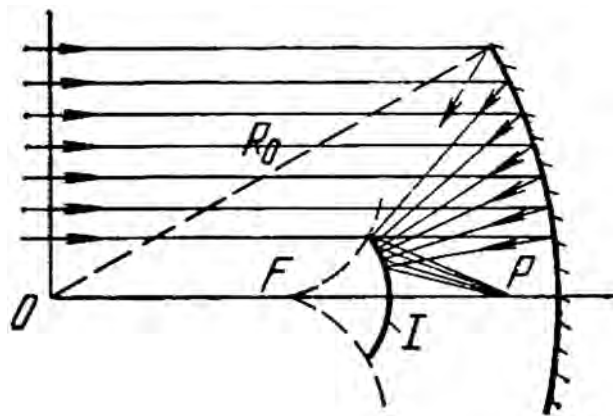


Рис. 389

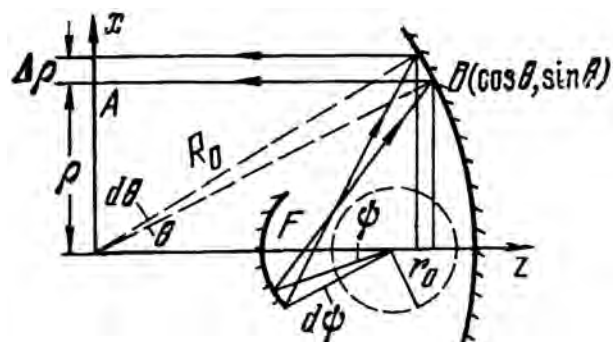


Рис. 390

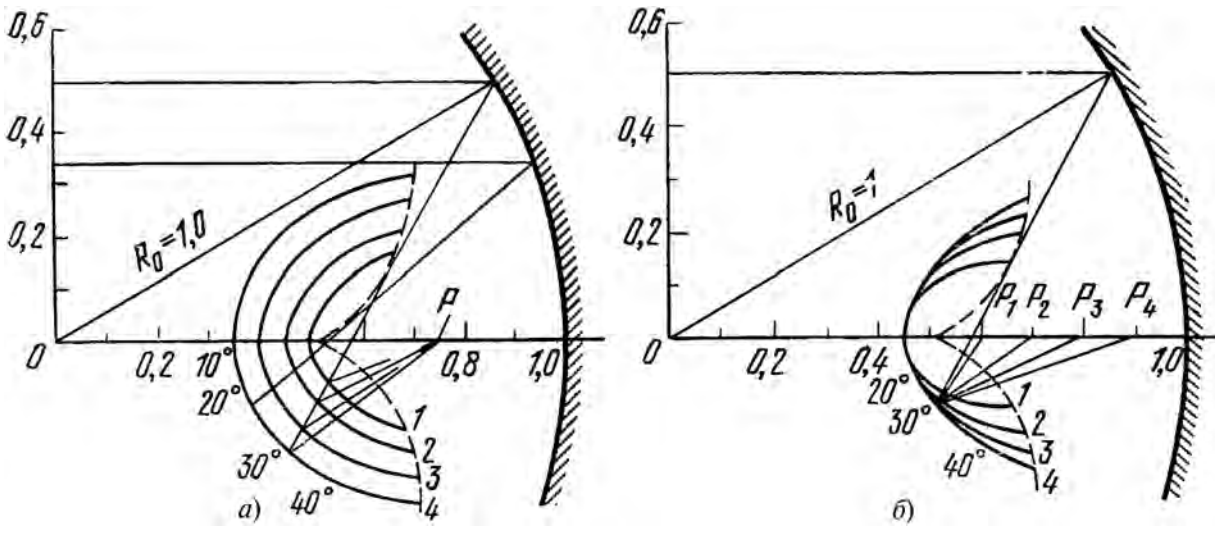


Рис. 391

длину оптического пути любого луча. Размеры корректирующего зеркала в этой схеме ограничены точкой касания крайним лучом каустики и его величина оказывается значительной, если необходим достаточно большой размер апертурного угла сферического зеркала. Из-за этого корректирующее зеркало в схеме Кассегрена сильно затеняет апертуру антенны и эта схема обычно не применяется для коррекции фазового распределения.

На рис. 391, а показаны профили различных корректирующих зеркал в зависимости от положения их вершины, а на рис. 391, б — профили при различных положениях фокуса двухзеркальной антенны. Пересечение профилем зеркала каустики определяет максимальное значение апертурного угла, который не может быть более 45°. Однако в общем случае максимальный апертурный угол не является оптимальным с точки зрения КИП и эффективности апертуры при сканировании. На рис. 392 обобщены результаты рис. 391, а и б. Здесь по вертикали слева отложена величина максимальной угловой апертуры в градусах, по вертикали справа — отношение радиуса сферы к облучаемому диаметру, отрезок 1 на горизонтали соответствует различным положениям вершины корректирующего зеркала, отрезок 2 определяет положение фокуса антенны. Номера кривых соответствуют номерам зеркал.

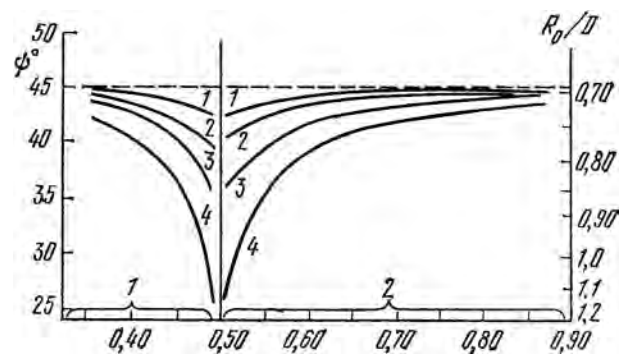


Рис. 392

зок 1 на горизонтали соответствует различным положениям вершины корректирующего зеркала, отрезок 2 определяет положение фокуса антенны. Номера кривых соответствуют номерам зеркал.

В качестве облучателя двухзеркальной сферической антенны целесообразно использовать гофрированный волновод или конический рупор, которые отличаются пониженной величиной кроссполяризации. Если в качестве облучателя применить рупор с гофрированными стенками, то условия распространения в нем гибридной волны создаются такие, что отношение аксиальных компонент электрического и магнитного полей равно волновому сопротивлению свободного пространства.

При выполнении облучателя в соответствии с этим условием диаграмма направленности облучателя имеет осевую симметрию, а так как поле в апертуре рупора линейно поляризовано, то нет и кроссполяризованных компонент в поле излучения.

а) **Расчет поля в апертуре антенны.** Для расчета поля в раскрыве можно воспользоваться уравнением баланса энергии в элементарных пучках лучей:

$$\frac{|E_{\text{раскр}}(\theta)|^2}{2W} 2\pi r dr = \frac{|E_{\text{обл}}(\psi)|^2}{2W} 2\pi r_0^2 \sin \psi d\psi. \quad (111)$$

Здесь  $E_{\text{раскр}}(\theta)$  — поле в раскрыве антенны,  $E_{\text{обл}}(\psi)$  — поле облучателя на поверхности сферы радиуса  $r_0$ ,  $W$  — волновое сопротивление свободного пространства,  $2\pi r dr$  — площадь элементарного кольца в раскрыве антенны,  $2\pi r_0^2 \sin \psi d\psi$  — площадь поверхности элементарного шарового слоя на сфере радиуса  $r_0$ ,  $\frac{|E_{\text{раскр}}(\theta)|^2}{2W}$  — плот-

ность потока мощности в раскрыве,  $\frac{|E_{\text{обл}}(\psi)|^2}{2W}$  — плотность потока мощности облучателя на поверхности сферы радиуса  $R_0$ .

Предположим, что в качестве облучателя используется гофрированный (гибридно-модовый) волновод, поле которого можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} E_{\text{обл}\psi} &= \frac{k^2 a e^{-ikr}}{2rk_{11}^2} F(\psi) \sin\Phi, \\ E_{\text{обл}\Phi} &= \frac{k^2 a e^{-ikr}}{2rk_{11}^2} F(\psi) \cos\Phi, \end{aligned} \quad (112)$$

где  $k_{11}$  — коэффициент распространения гибридной волны  $HE_{11}$ ,  $a$  — радиус раскрыва волновода,  $F(\psi)$  — диаграммная функция.

Подставляя (112) в (111), а также учитывая, что  $\rho = R_0 \sin\theta$  (рис. 390), получим

$$|E_{\text{раскр}}(\theta)| = \frac{k^2 a}{2Rk_{11}^2} |F(\psi)| \sqrt{\frac{2 \sin\psi d\psi}{\sin 2\theta d\theta}}.$$

Это выражение можно переписать в векторной форме, обозначая корень квадратный через  $G(\theta)$ :

$$E_{\text{раскр}}(\theta) = \frac{k^2 a}{2Rk_{11}^2} F(\psi) G(\theta) \exp(-ikL) \mathbf{e}_a,$$

где  $L$  — полная длина пути от облучателя до плоскости раскрыва,  $\mathbf{e}_a$  — единичный вектор, определяющий поляризацию поля облучателя.

Координатная функция  $G(\theta)$  связана с формой корректирующего зеркала через производную  $d\psi/d\theta$ . Рассмотрим эту связь. Уравнение кор-

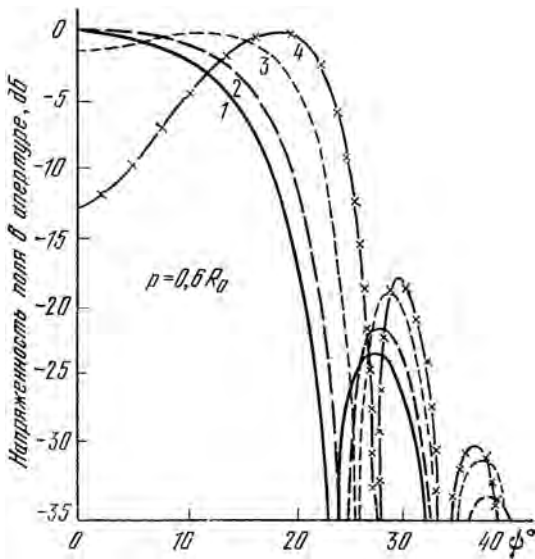


Рис. 393

ректирующего зеркала можно записать в прямоугольных координатах  $u$  и  $v$

$$\begin{aligned} u &= \\ &= C \frac{[C^2 - 4(1-n)C - (1+p^2) + (2+p-2n)^2](2C^2 - 1)}{4(pC - C - n + 1)}, \\ v &= \pm \frac{S(2Cu - 1)}{2C^3 - 1}. \end{aligned}$$

Здесь  $v$  откладывается по вертикали, а  $u$  — по горизонтали от центра кривизны главного зеркала,  $C = \cos\theta$ ,  $S = \sin\theta$ ,  $n$  — расстояние от центра сферы до вершины корректирующего зеркала,  $p$  — расстояние от центра сферы до фокуса антенны.

На основании сказанного выше можно написать

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{v}{u-p}.$$

Так как  $u$  и  $v$  есть функция угла  $\theta$ , т. е.

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{v(\theta)}{u(\theta) - p},$$

то для производной  $d\psi/d\theta$  можно получить следующее выражение:

$$\frac{d\psi}{d\theta} = \frac{(u-p) \frac{dv}{d\theta} - v \frac{du}{d\theta}}{(u-p)^2 + v^2},$$

а из уравнений для  $u$  и  $v$  следует, что

$$\begin{aligned} \frac{du}{d\theta} &= \{4pC^5 - [4p(2+p-2n) + 6]C^4 + \\ &+ 8(3+p-3n)C^3 + [2p^2 - 1 + 2(2+p-2n) \times \\ &\times (8n-8-p)]C^2 + \{6(1-n) - 2(2+p-2n) \times \\ &\times [1+p^2 - (2p-2n)^2]\}C + (1+p^2) - \\ &- (2+p-2n)^2\}S/4(pC^2 - C - n + 1)^2, \\ \frac{dv}{d\theta} &= \pm \frac{2C^3 - 3C + 2u + 2CS(2C^2 - 1) \frac{du}{d\theta}}{(2C^2 - 1)^2}. \end{aligned}$$

И наконец, для  $G(\theta)$  получаем следующее выражение:

$$G(\theta) = \left\{ \frac{\frac{(1-2Cu)}{C(2C^2-1)} \left[ (u-p) \frac{dv}{d\theta} - v \frac{du}{d\theta} \right]}{[(u-p)^2 + v^2]^{3/2}} \right\}^{1/2}.$$

На рис. 393, 394 показано распределение поля в раскрыве антенны при использовании волнового облучателя для различных положений вершины корректирующего зеркала и фокуса антенны (см. рис. 391). Затенение апертюры определяется проекцией корректирующего зеркала на плоскость апертюры. Корректирующее зерка-



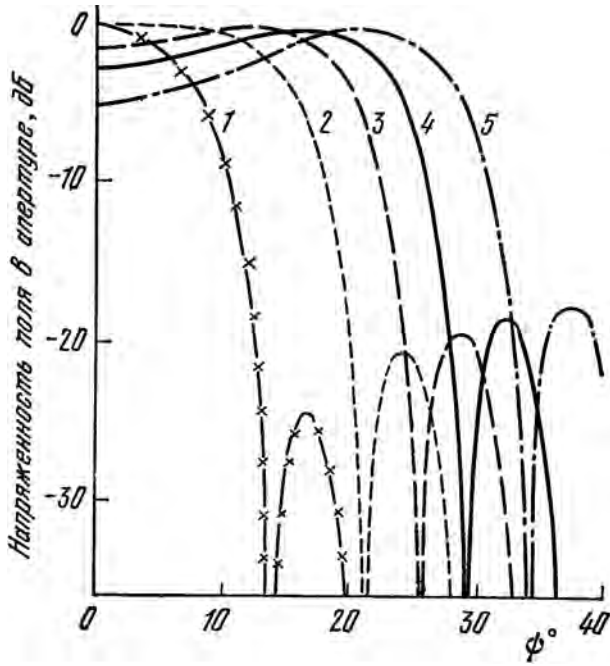


Рис. 394

Таблица 1

I	II	III	IV	V
1	0,35R	16,0°	0,62	-13,0
2	0,40R	18,0°	0,75	-14,9
3	0,45R	21,3°	0,89	-15,6
4	0,49R	25,0°	0,89	-12,9

Таблица 2

I	II	III	IV	V
1	0,50R	10,4°	0,84	-20,1
2	0,55R	17,0°	0,87	-17,2
3	0,60R	21,3°	0,88	-14,4
4	0,65R	24,5°	0,88	-14,4
5	0,75R	30,2°	0,86	-13,3

ло рассчитывалось для такого апертурного угла, который соответствовал бы максимальной величине коэффициента использования площади раскрыва антенны.

В табл. 1 в столбце I указаны номера кривых рис. 393, в столбце II — положение вершины корректирующего зеркала, в столбце III — оптимальный апертурный угол, в столбце IV — коэффициент использования площади раскрыва, в столбце V — уровень первого бокового лепестка при  $D/\lambda = 100$  (в дБ).

В табл. 2 в столбце I указаны номера кривых рис. 394 в столбце II — положение фокуса антенны, в столбце III — оптимальный апертурный угол, в столбце IV — КИП, в столбце V — уровень первого бокового лепестка при  $D/\lambda = 100$ .

Рис. 393 и 394 показывают, что провал в распределении амплитуд поля увеличивается по мере приближения вершины корректирующего зеркала к параосиальному фокусу (положение фокуса антенны фиксировано). В то же время при фиксированном положении вершины корректирующего зеркала провал увеличивается при увеличении фокусного расстояния антенны, т. е. при удалении облучателя от параосиального фокуса.

На рис. 395, а показана форма диаграммы направленности гипотетического облучателя, которая могла бы обеспечить равномерное распределение поля по апертуре. На этом рисунке по вертикали отложено нормированное значение поля (дБ), а по горизонтали — угол  $\psi$ , отсчитываемый от оси антенны. Графики рис. 395, а получены при расположении вершины корректирующего зеркала в точке  $0,49R_0$ , причем кривая 1 соответствует положению фокуса антенны в точке  $0,5R_0$ , кривая 2 — в точке  $0,55R_0$ , кривая 3 — в точке  $0,6R_0$ , кривая 4 — в точке  $0,65R_0$ . На каждой кривой поставлено значение максимального угла ( $\theta_m$ ), соответствующего облучаемому краю сферического зеркала.

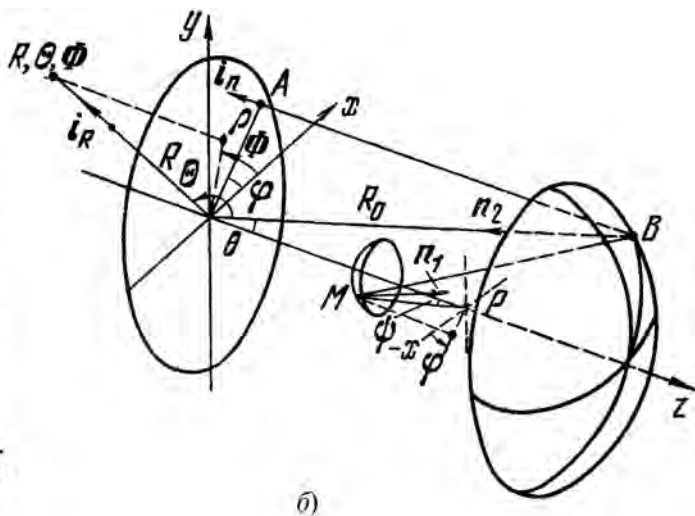
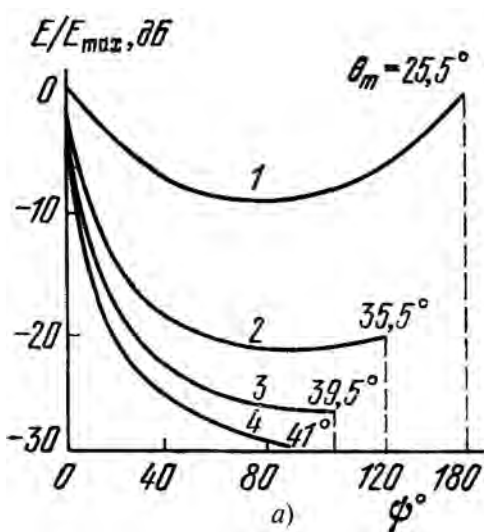


Рис. 395

б) **Диаграмма направленности антенны.** Поле, создаваемое антенной, может быть рассчитано апертурным методом по известной формуле

$$E(R, \Theta, \Phi) = -\frac{ike^{-ikR}}{4\pi R} [\mathbf{i}_R[(\mathbf{i}_n + \mathbf{i}_R)\mathbf{N}]],$$

где

$$\mathbf{N} = \int_{\text{раскр}} \mathbf{E} \exp(ik\rho\mathbf{i}_R) dS = N_x\mathbf{i}_x + N_y\mathbf{i}_y;$$

здесь, как показано на рис. 395, б,  $\mathbf{i}_R$  — единичный вектор из начала координат в точку наблюдения;  $\rho, \varphi$  — полярные координаты точки  $A$  в плоскости апертуры;  $dS$  — элемент площади в апертуре;  $\mathbf{i}_n$  — единичная нормаль к плоскости апертуры;  $\mathbf{N}$  — векторная функция.

Плоскость раскрыва проходит через центр сферического зеркала и поэтому

$$\rho = R_0 \sin\theta(\mathbf{i}_x \cos\varphi + \mathbf{i}_y \sin\varphi),$$

$$\mathbf{i}_R = \mathbf{i}_x \cos\Phi \sin\Theta + \mathbf{i}_y \sin\Phi \sin\Theta + \mathbf{i}_z \cos\Theta,$$

$$(\rho\mathbf{i}_R) = R_0 \sin\theta \sin\Theta \cos(\varphi - \Phi),$$

$$dS = \rho d\varphi d\rho = R_0^2 \sin\theta \cos\theta d\varphi d\theta.$$

В дальней зоне на расстоянии  $R$  имеются только поперечные компоненты поля, которые описываются следующими выражениями:

$$E_\Theta(R, \Theta, \Phi) = -\frac{ik \exp(-ikR)}{4\pi R} (1 - \cos\Theta)(N_x \cos\Phi + N_y \sin\Phi),$$

$$E_\Phi(R, \Theta, \Phi) = -\frac{ik \exp(-ikR)}{4\pi R} (1 - \cos\Theta)(N_x \sin\Phi - N_y \cos\Phi).$$

Вблизи оси  $\cos\Theta \approx -1$  и  $1 - \cos\Theta \approx 2$ . С учетом выражения для распределения поля на апертуре антенны, соответствующего линейной поляризации облучателя, с достаточной точностью получим

$$\mathbf{N} = -\mathbf{i}_y \frac{k^2 a R_0 \exp(-ikL)}{2k_{11}^2} \int_{\theta_b}^{\theta_0} \int_0^{2\pi} F(\psi) G(\theta) \times \\ \times \{\exp[ikR_0 \sin\theta \sin\Theta \cos(\varphi - \Phi)]\} \sin\theta \cos\theta d\theta d\varphi.$$

Интегрирование в последнем уравнении учитывает эффект затенения в приближении геометрической оптики. Так как  $F(\psi)$  не зависит от угла  $\Phi$ , то интегрирование по  $\Phi$  может быть выполнено аналитически. Окончательно получаем

$$E_\Theta = -\frac{ik^3 a R_0}{4Rk_{11}^2} \{\exp[-ik(R + L)]\} N(\Theta) \sin\Phi,$$

$$E_\Phi = -\frac{ik^3 a R_0}{4Rk_{11}^2} \{\exp[-ik(R + L)]\} N(\Theta) \cos\Phi,$$

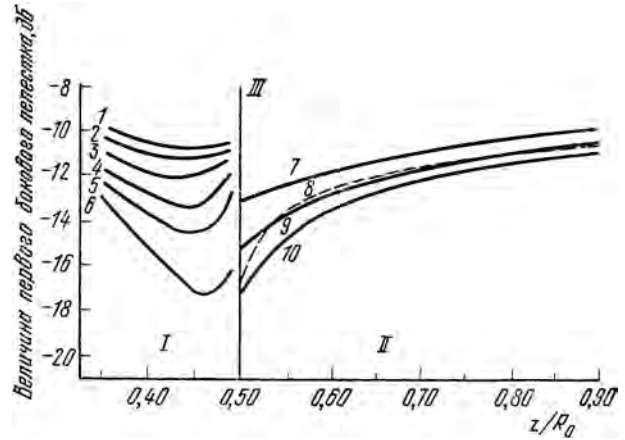


Рис. 396

где  $N(\Theta) = (1 - \cos\Theta) \int_{\theta_b}^{\theta_0} F(\psi) G(\theta) J_0(kR_0 \sin\theta \sin\Theta) \times$

$\times \sin\theta \cos\theta d\theta;$

$\theta_b = 1/\sin\upsilon_{\max}$ ,  $\upsilon_{\max}$  — радиус корректирующего зеркала.

Уравнения для  $E_\Theta$  и  $E_\Phi$  показывают, что поле излучения антенны линейно поляризовано и имеет круговую симметрию, т. е. диаграмма направленности в Е- и Н-плоскостях имеет одинаковую ширину. При более точном анализе следует учитывать переливание энергии облучателя за края корректирующего зеркала, а также дифракционные явления на краях зеркал.

На рис. 396 приведен ряд кривых, обобщающих результаты расчета диаграммы направленности по полученным формулам для сферических антенн с различными параметрами. А именно, на рисунке дана зависимость уровня первого бокового лепестка при использовании конического гофрированного рупора. На оси абсцисс интервал I соответствует различным положениям вершины корректирующего зеркала, интервал II определяет положение фокуса антенны, линия III соответствует положению параксиального фокуса, кривые 1–10 соответствуют положению фокуса в точках 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,55; 0,5; 0,48; 0,45; 0,4 и 0,35  $R_0$ .

Эти кривые получены для оптимальной угловой апертуры при  $D/\lambda = 100$  с учетом эффекта затенения. Высокий уровень бокового излучения возникает из-за провала в амплитудном распределении в раскрыве и затенения, как это следует из рис. 393 и 394.

в) **Коэффициент использования раскрыва.** КИП определяется как отношение усиления данной антенны к усилению антенны с равномерным распределением амплитуды и фазы по ее раскрыву, причем обе антенны имеют одинаковые по форме и размерам апертуры.

Общее выражение для КИП связано с выражением для поля антенны и поля облучателя:

$$\text{КИП} = \frac{k^2 R_0^2 \left| \int_{\theta_b}^{\theta_0} (1 - \cos \theta) F(\psi) G(\theta) J_0(k R_0 \sin \theta \sin \theta) \sin \theta \cos \theta d\theta \right|^2}{2 \int_0^{\pi} |F(\psi)|^2 \sin \psi d\psi}$$

Так как  $\theta_0$  есть угловая апертура сферического зеркала, диаметр апертуры  $D = 2R_0 \sin \theta_0$ ; коэффициент усиления апертуры такого размера с постоянным распределением амплитуды и фазы равен

$$K_{Y0} = \frac{4\pi^2 R_0^2 \sin^2 \theta_0}{\lambda^2} = (k R_0 \sin \theta_0)^2.$$

Тогда нормированный КИП равен

$$q = \frac{\left| \int_{\theta_b}^{\theta_0} (1 - \cos \theta) F(\psi) G(\theta) J_0(k R_0 \sin \theta \sin \theta) \sin \theta \cos \theta d\theta \right|^2}{2 \sin^2 \theta_0 \int_0^{\pi} |F(\psi)|^2 \sin \psi d\psi}$$

Обычно рассматривают только максимальный КИП, который имеет место при  $\Theta = 180^\circ$ :

$$q_{\max} = \frac{2 \left| \int_{\theta_b}^{\theta_0} F(\psi) G(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta \right|^2}{2 \sin^2 \theta_0 \int_0^{\pi} |F(\psi)|^2 \sin \psi d\psi}$$

Угловая апертура сферического зеркала, которая соответствует освещенной части его поверхности, зависит от размера корректирующего зеркала. Зависимость  $\theta$  от угловой апертуры была изучена при различных положениях фокуса антенны и вершины корректирующего зеркала при трех гибридно-модовых облучателях. На рис. 397, 398 даны кривые, по которым можно определить угловую апертуру  $\theta_0$ , соответствующую максимальному коэффициенту использования площади апертуры  $q_{\max}$ . Здесь *I* — группа кривых, определяющих зависимость КИП от апертурного угла, *II* — зависимость отношения усиления к шумовой температуре ( $G/T_A$ ), *III* — зависимость шумовой температуры. Кривые *I* соответствуют положению вершины корректирующего зеркала в точке  $0,35R_0$ , кривые *2* —  $0,4R_0$ , *3* —  $0,45R_0$ , *4* —  $0,49R_0$ . Рис. 397 соответствует первому облучателю с фокусом в точке  $0,88R_0$ , рис. 398 — второму облучателю в точке  $0,85R_0$ , рис. 399 — третьему облучателю в точке  $0,78R_0$ .

На рис. 400 дана характерная зависимость  $q_{\max}$  от положения фокуса и вершины корректирующего зеркала для гофрированного рупора (интервал *I* — положение вершины корректирующего

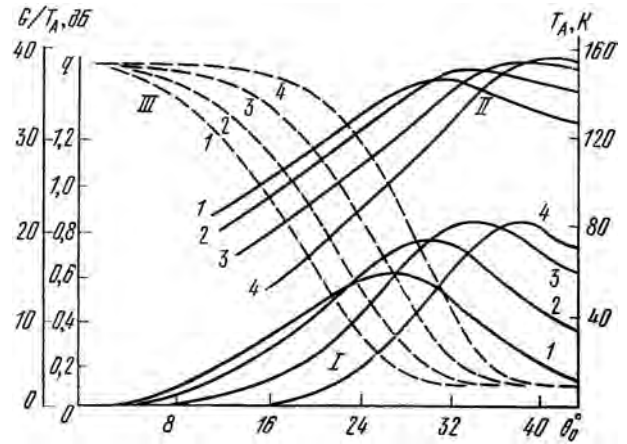


Рис. 397

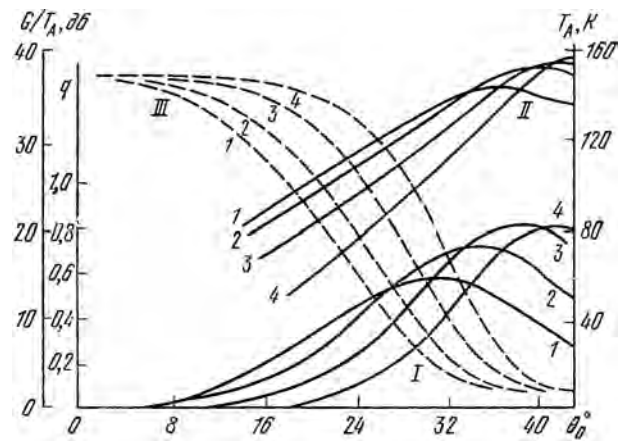


Рис. 398

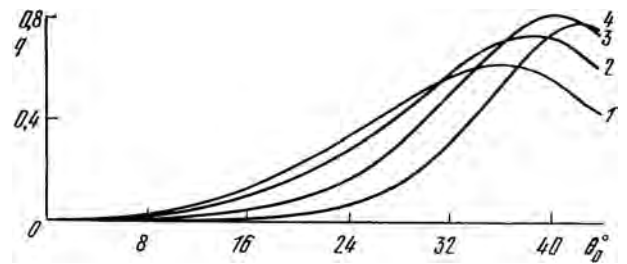


Рис. 399

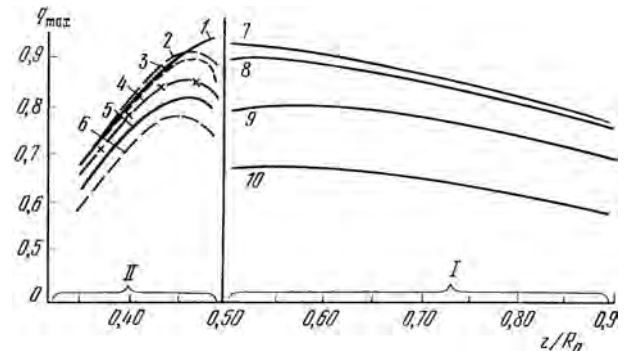


Рис. 400

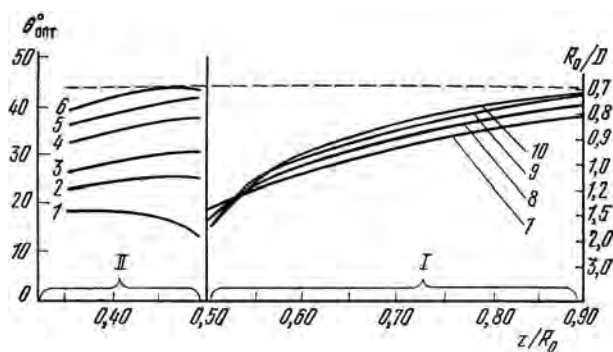


Рис. 401

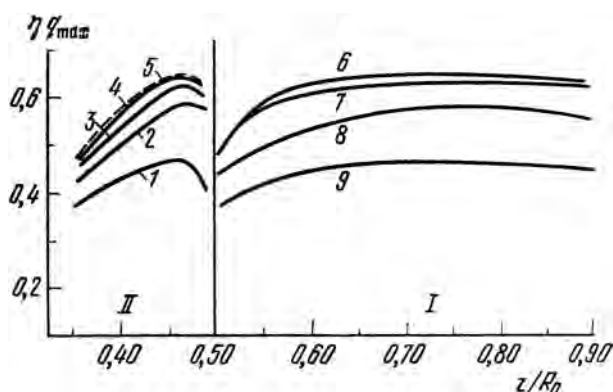


Рис. 402

щего зеркала, интервал II — положение фокуса антенны, кривые I—6 соответствуют положению фокуса антенны в точках 0,5; 0,55; 0,6; 0,7; 0,8 и 0,9 $R_0$ , кривые 7—10 — положению вершины корректирующего зеркала в точках 0,47; 0,45; и 0,35 $R_0$  соответственно. Эти же обозначения сохранены также и на рис. 401 и 402.

Как видно из рисунков,  $q_{\text{max}}$  быстро увеличивается по мере приближения корректирующего зеркала к параксиальному фокусу, однако при таком расположении этого зеркала появляется

провал в амплитудном распределении и, как следствие, большой уровень боковых лепестков.

При фиксированном положении корректирующего зеркала наблюдается лишь незначительное уменьшение  $q_{\text{max}}$  при удалении фокуса антенны от параксиального фокуса. Это объясняется тем, что провал в амплитудном распределении компенсируется в некоторой степени увеличением эффективности облучения поверхности сферического зеркала. Оптимальная угловая апертура  $\theta_{\text{опт}}$  (рис. 401), однако, увеличивается, в то время как вершина корректирующего зеркала приближается к параксиальному фокусу, а фокус антенны — к сферическому зеркалу.

Ценность большой угловой апертуры проявляется, когда сканирование осуществляется перемещением облучателя вместе с корректирующим зеркалом. В этом случае эффективность использования площади раскрыва антенны, очевидно, равна отношению

$$\eta = \frac{\text{используемая площадь апертуры}}{\text{полная площадь апертуры}} = \left[ \frac{\sin \theta_0}{\sin(\theta_0 + |\theta_{\text{max}}|)} \right]^2,$$

где  $\theta_{\text{max}}$  — максимальный угол сканирования.

Коэффициент использования апертуры при сканировании будет определяться произведением  $\eta q_{\text{max}}$ . На рис. 402 дана зависимость этого произведения от положения фокуса антенны (интервал I) и вершины корректирующего зеркала (интервал II). Как видно, произведение  $\eta q_{\text{max}}$  быстро увеличивается при приближении вершины корректирующего зеркала к параксиальному фокусу. Максимум коэффициента использования апертуры можно получить, применяя корректирующее зеркало с вершиной вблизи параксиального фокуса, облучателем, имеющим узкую диаграмму и фокусом вблизи поверхности сферического зеркала.

## ДВУХЗЕРКАЛЬНЫЕ КОНЦЕНТРИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ

В настоящее время в связи с развитием радиолокации, радиоастрономии и техники космической связи большое внимание уделяется созданию антенн, позволяющих осуществить сканирование диаграммы направленности в широком секторе углов при минимальном искажении ее формы. Этому требованию, как отмечалось выше, удовлетворяют антенны, построенные на базе сферических зеркал, у которых в силу симметрии можно сохранить постоянство эффективной апертуры при сканировании, а следовательно, и минимальное искажение диаграммы. К таким антеннам относятся однозеркальные сферические, сферопараболические, спирально-сферические, двухзеркальные с главным сферическим зеркалом и вспомогательным зеркалом специальной формы и другие.

Рассмотренные выше однозеркальные и двухзеркальные сферические антенны допускают только механическое сканирование в широком секторе углов. В однозеркальных антеннах перемещение луча осуществляется путем вращения облучающей системы относительно центра неподвижного сферического зеркала. В двухзеркальных антеннах с корректирующим вспомогательным зеркалом при сканировании вместе с облучателем вращается также и вспомогательное зеркало. Необходимость перемещения облучателя является недостатком сферических антенн, так как облучающее устройство, механизм крепления и вращения находятся в раскрытии антенны на пути лучей и затеняют раскрытие.

Кроме того, в связи с ростом скоростей летящих объектов и необходимостью расширения сектора обзора, требования к увеличению скорости сканирования возрастают. В некоторых случаях наряду с высокой скоростью сканирования необходим обзор пространства по определенному закону с быстрой переборкой луча из одного положения в другое. Так как механическое сканирование связано с перемещением определенных масс, то, несмотря на свою простоту и надежность, оно ограничено по скорости, а следовательно, неприемлемо в остроуправляемых антеннах с быстрым перемещением луча.

Для того чтобы управлять положением луча в сферической антенне, наиболее удобным является коммутационный метод электрического сканирования. Его можно осуществить в антенне, схема которой приведена на рис. 403 [12]. Рассмотрим принцип ее действия. Антенна со-

стоит из главного сферического зеркала *I*, вспомогательного зеркала *II* и облучателя *III*. Основной особенностью антенны является то, что главное и вспомогательное зеркала имеют форму концентрических сферических поверхностей, т. е. имеют общий центр (точка *O*). Если облучатель, излучающий сферический фронт волны, расположить на некотором расстоянии от поверхности главного зеркала, то после отражения от поверхностей зеркал при определенном соотношении между радиусами кривизны главного  $R$  и вспомогательного  $r$  зеркал на части раскрытия может быть получено фазовое распределение, близкое к равномерному. Величина фазовой ошибки зависит от размера апертуры и соотношения между радиусами зеркал. Расположив у поверхности главного зеркала определенное количество облучателей, можно изменять положение луча в пространстве путем переключения их фазовых центров. Так как поверхности зеркал концентричны, то при сканировании в широком секторе углов форма диаграммы направленности, коэффициент усиления и другие характеристики не искажаются. Эта антенна обладает всеми преимуществами, присущими двухзеркальным антеннам по сравнению с однозеркальными: уменьшение продольных размеров, отсутствие длинных фидеров, идущих от облучателя, наличие вспомогательного зеркала, которое является

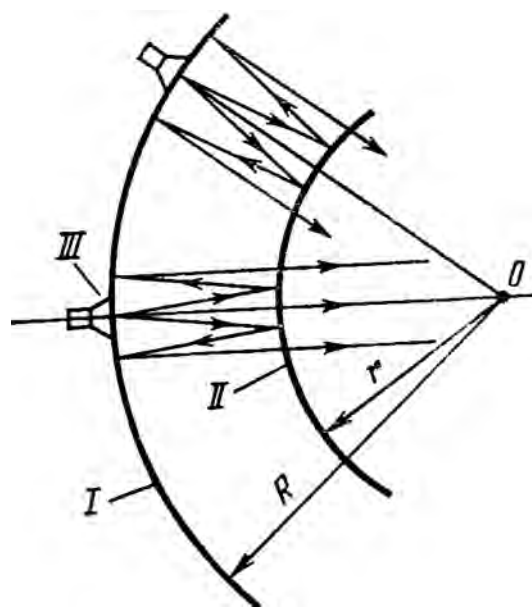


Рис. 403

дополнительной степени свободы при оптимизации параметров.

Кроме того, так как облучатели расположены непосредственно у главного зеркала, то элементы их крепления и фидерные тракты не лежат в поле излучения, а следовательно, затенение раскрыва получается незначительным.

Для того чтобы оценить возможность использования совокупности концентрических зеркал в качестве антенны, рассмотрим рис. 404. Здесь на систему зеркал I и II падает параллельный пучок лучей. Фокусирующие свойства антенны можно оценить по поперечному и продольному размерам фокального пятна. Поперечные размеры фокального пятна можно вычислить, определяя ординату  $y_{\Pi}$  пересечения каждого луча с плоскостью  $x = -R$  после его прохождения через антенну в режиме приема. Для  $y_{\Pi}$  можно получить следующее выражение:

$$y_{\Pi} = -\frac{\alpha \left[ \beta^2 - 2\sqrt{1-\alpha^2}(2\alpha^2 - \beta^2) - 2(1-2\alpha^2)\sqrt{\beta^2 - \alpha^2} \right]}{(1-2\alpha^2)(2\alpha^2 - \beta^2) - 4\alpha^2\sqrt{1-\alpha^2}\sqrt{\beta^2 - \alpha^2}}. \quad (113)$$

Продольные размеры фокального пятна определим как абсциссу пересечения рассматриваемого луча с осью  $x$ :

$$x_{\Pi} = -\frac{1}{2} \frac{\beta^2}{\sqrt{1-\alpha^2}(2\alpha^2 - \beta^2) + \sqrt{\beta^2 - \alpha^2}(1-2\alpha^2)}. \quad (114)$$

В соотношениях (113), (114),  $\beta = r/R$  — отношение радиусов главного и вспомогательного зеркал,  $\alpha$  — ордината пересечения падающего луча с главным зеркалом  $y_{\text{гл}}$ , отнесенная к радиусу главного зеркала  $R$  ( $\alpha = y_{\text{гл}}/R$ ).

На рис. 405 приведены результаты численных расчетов поперечного размера фокусного пятна по формуле (113) для  $0,05 \leq \alpha \leq 0,5$ ;  $0,55 \leq \beta \leq 0,85$ .

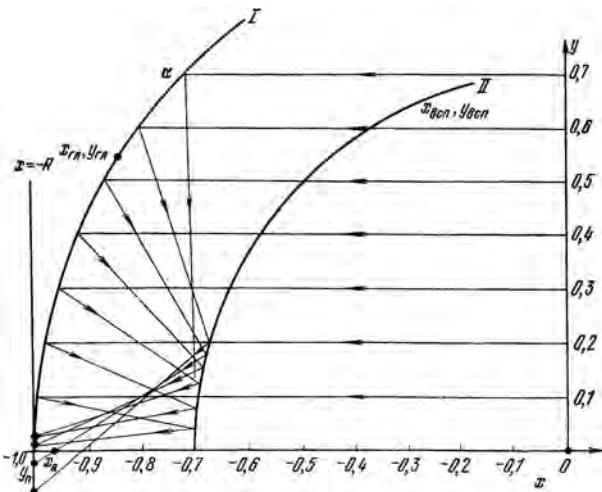


Рис. 404

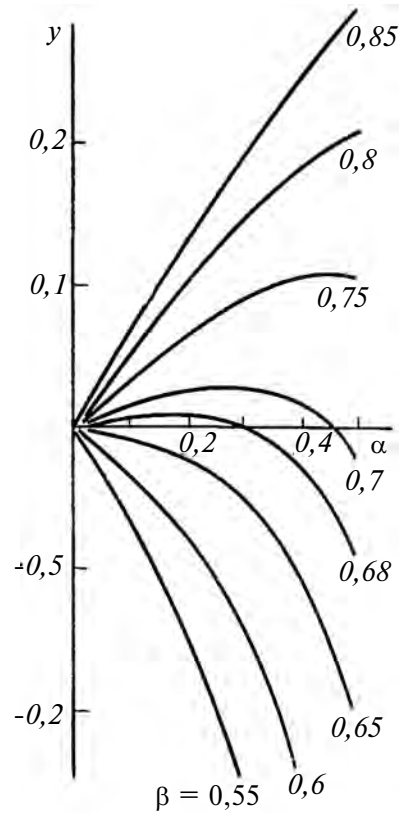


Рис. 405

По формуле (114) можно определить продольные размеры фокусного пятна  $\Delta_{\text{ф.п}}$  для заданной величины раскрыва антенны. Как следует из формул (113) и (114), размеры фокусного пятна зависят от соотношения между радиусами главного и вспомогательного зеркал ( $\beta$ ) и размерами действующей апертуры ( $\alpha$ ).

Исследуем выражение (113) на экстремум.

Для этого приравняем к нулю производные  $\frac{\partial y_{\Pi}}{\partial \alpha}$

и  $\frac{\partial y_{\Pi}}{\partial \beta}$ . Как показывает анализ,  $\frac{\partial y_{\Pi}}{\partial \alpha} \neq 0$  ни при

каких  $\alpha$ . Сопоставляя этот результат с зависимостями, представленными на рис. 405, можно сделать вывод, что при фиксированном  $\beta$  можно определить область значений  $\alpha$ , для которой  $\Delta_{\text{ф.п}} = \text{const}$ , и значение  $\alpha$ , начиная с которого величина фокусного пятна резко возрастает (рис. 406). Следовательно, для данного размера апертуры можно определить  $\beta$ , при котором величина размера фокусного пятна минимальна. Это значение  $\beta$  можно считать оптимальным для данного размера апертуры. Таким образом, в качестве критерия оптимальности в этом случае берется минимальное значение поперечных размеров фокусного пятна. Результаты этого исследования приведены на рис. 407, где представлена зависимость между размером раскрыва  $\alpha$  и оптимальным значением радиуса вспомогательного зеркала  $\beta_{\text{опт}}$ .

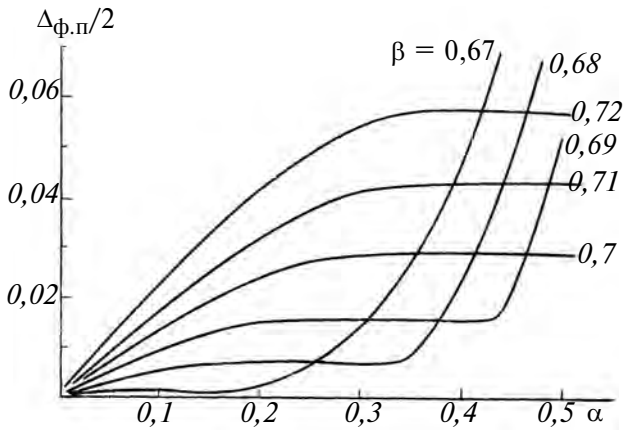


Рис. 406

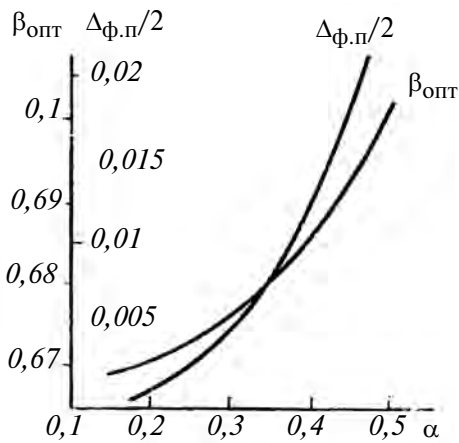


Рис. 407

На этом же графике приведена величина  $\Delta_{\phi.п}$  для этих значений  $\alpha$  и  $\beta$ . Как видно из рисунка,  $\beta_{\text{опт}} \approx 0,7$ .

В качестве критерия оптимальности можно также принять минимум величины среднеквадратичного отклонения точек  $y_{\text{п}}$  от оси антенны. В первом приближении выражение для величины среднеквадратичного отклонения имеет следующий вид:

$$\int_0^{\alpha} y^2(\alpha, \beta) d\alpha = \frac{\beta^2(\beta^2 + 5)}{(1 - \beta)^2(3\beta - \beta^2 - 1)} \times \\ \times 2\alpha \sqrt{\frac{\beta}{2(1 - \beta)(3\beta - \beta^2 - 1)}} \times \\ \times \frac{2(1 - \beta)(\beta^2 + \sqrt{\beta} - 1) - 3\beta + \beta^2 + 1}{2\sqrt{\beta + \sqrt{\beta} - 1}}.$$

На рис. 408 представлена зависимость минимальной величины среднеквадратичного отклонения  $\Delta_{\text{ср.кв}}^{\text{мин}}$  от  $\alpha$  для различных  $\beta$ . Для любого значения апертуры  $\alpha$  можно найти оптимальное

значение  $\beta$ , при котором величина  $\Delta_{\text{ср.кв}}$  минимальна.

В процессе расчета сферических концентрических антенн необходимо достаточно точно определять положение центра приема или излучения в зависимости от отношения радиусов поверхности зеркал и величины допустимых искажений. Для этого необходимо рассчитать форму волнового фронта вблизи фокуса в приемном режиме работы антенны и определить центр этого фронта.

Рассмотрим еще раз рис. 404, на котором показан ход лучей в антенне; здесь плоский фронт волны проходит через начало координат и совпадает с осью  $y$ . Зададим величину оптического пути  $a$ , которая определяет положение и форму фронта в фокальной области. Уравнение этого фронта зададим координатами  $x_{\phi}$  и  $y_{\phi}$ . Тогда

$$a = x_{\text{ГЛ}} + \sqrt{(x_{\text{ГЛ}} + x_{\text{ВСП}})^2 + (y_{\text{ГЛ}} + y_{\text{ВСП}})^2} + \\ + \sqrt{(x_{\phi} - x_{\text{ВСП}})^2 + (y_{\phi} - y_{\text{ВСП}})^2}.$$

Для координат фронта можно получить следующее выражение:

$$x_{\phi} = \frac{a + \sqrt{r^2 - a^2} - 2\sqrt{R^2 - a^2}}{R^2 r^2} \times \\ \times (R^2 - 2x^2)(r^2 - 2\alpha^2) + 4\alpha^2 \sqrt{R^2 - \alpha^2} \sqrt{r^2 - \alpha^2} + \\ + \frac{(R^2 - 2\alpha^2)\sqrt{r^2 + \alpha^2} + 2\alpha^2 \sqrt{R^2 - \alpha^2}}{R^2}, \\ y_{\phi} = \frac{2\alpha}{R^2 r^2} (a + \sqrt{r^2 - \alpha^2} - 2\sqrt{R^2 - \alpha^2}) \times \\ \times [(r^2 - 2\alpha^2)\sqrt{R^2 - \alpha^2} - (R^2 - 2\alpha^2)\sqrt{r^2 - \alpha^2}] \times \\ \times \frac{2\alpha \sqrt{r^2 - \alpha^2} (\sqrt{r^2 - \alpha^2} - \sqrt{R^2 - \alpha^2})}{R^2} + \alpha.$$

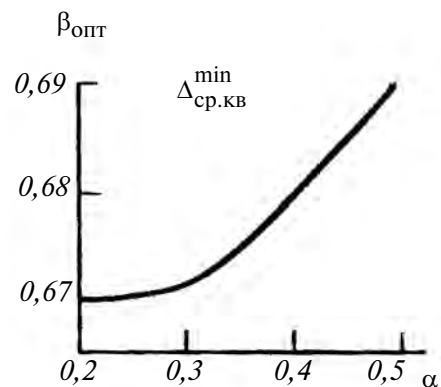


Рис. 408

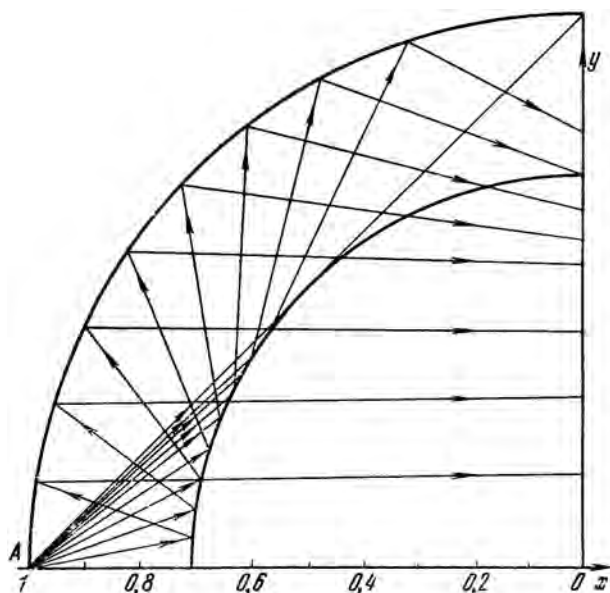


Рис. 409

Линия, соединяющая точки с координатами  $x_{\text{ф}}$ ,  $y_{\text{ф}}$  при разных  $\alpha$ , и есть волновой фронт антенны в режиме приема.

Рассмотрим далее метод оптимизации параметров антенны по волновому фронту в раскрыве. При этом считаем, что облучатель, расположенный на поверхности главного зеркала в точке  $A$  (рис. 409), излучает сферический фронт волны. Зависимость разности хода произвольного луча и луча, идущего вдоль оси от точки  $A$  до плоскости  $x = 0$ , от размера апертуры и соотношения радиусов вспомогательного и главного зеркал выражается следующим образом:

$$\Delta = \frac{\beta^2 - 2\gamma}{\beta^2} \sqrt{\frac{1 - \gamma^2 [2\sqrt{\beta^2 - \gamma^2} - (3\beta^2 - 4\gamma^2)]}{(\beta^2 - 4\gamma^2) [\sqrt{\beta^2 - \gamma^2} - (\beta^2 - 2\gamma^2)]^2}} + 2\sqrt{(1 + \beta^2) - 2\sqrt{\beta^2 - \gamma^2}} - (3 - 2\beta),$$

где  $\Delta$  — разность хода лучей, отнесенная к радиусу главного зеркала,  $\gamma$  — ордината точки отражения луча от вспомогательного зеркала, также отнесенная к радиусу главного зеркала,  $\beta$  — отношение радиусов главного и вспомогательного зеркал.

Результаты расчетов, проведенных по этой формуле, приведены на рис. 410. Как видно из рисунка, при  $\beta = 0,67$  разность хода лучей изменяется от  $|\Delta| = 0$  до  $|\Delta| = 0,1$  ( $\alpha = 0,8$ ). Наибольшая разность хода лучей имеет место на краю раскрыва, причем она тем больше, чем меньше  $\beta$ . Для  $\beta = 0,7$  разность хода лучей на краю раскрыва не превышает 0,05 радиуса главного зеркала. Для значений  $\beta > 0,7$  разность хода на краю раскрыва уменьшается, но увеличивается разность хода лучей, лежащих внутри раскрыва.

В качестве критерия оптимальности можно взять максимальную величину разности хода лучей для данного размера апертуры антенны. Результаты расчета приведены на рис. 411. Выбирая некоторый критерий оптимальности, определяем необходимое соотношение между размером апертуры и радиусами главного и вспомогательного зеркал.

При проектировании сканирующей антенны обычно задаются шириной диаграммы направленности и сектором сканирования. Ширина диаграммы направленности однозначно связана с размером излучающего раскрыва антенны  $D$  и длиной волны  $\lambda$ , а сектор сканирования зависит от соотношения между размером излучающего раскрыва и размером полного раскрыва главного сферического зеркала. Очевидно, полный раскрыв сферического зеркала будет наибольшим, если использовать это зеркало в виде полусферы.

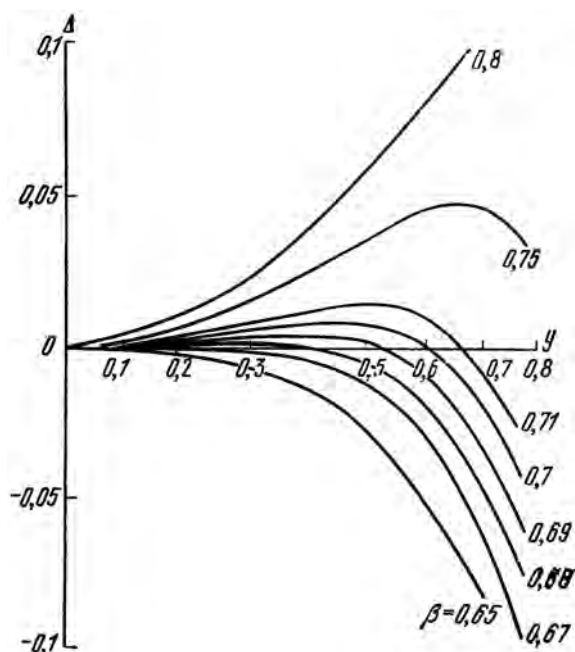


Рис. 410

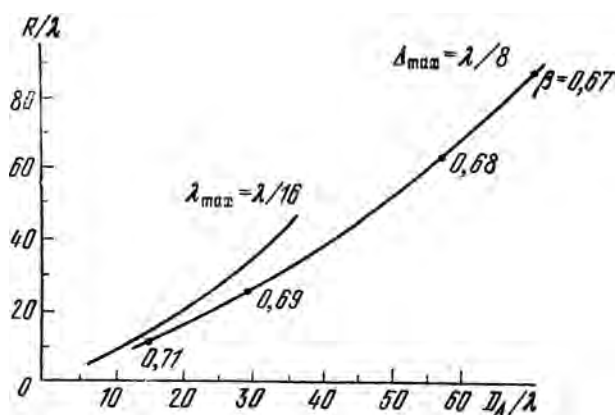


Рис. 411



Размер излучающего раскрыва определяется шириной диаграммы направленности, а соотношение излучающего и полного раскрывов зависит от того, какая фазовая ошибка допускается на краю излучающего раскрыва и какой необходим сектор сканирования. Если этот сектор не является достаточным, то он может быть увеличен за счет уменьшения доли излучающего раскрыва по отношению к полному. Поскольку размер излучающего раскрыва определяется требуемой шириной диаграммы, то он не может быть уменьшен произвольно. Поэтому размер полного раскрыва может быть увеличен за счет увеличения радиуса кривизны сферической поверхности главного зеркала. При этом ошибка на краю излучающего раскрыва будет меньше чем  $\pi/4 - \pi/8$ .

Полный сектор сканирования в полусферическом зеркале радиуса  $R$  равен

$$\Phi_{\max} = \pi - 2 \arcsin \frac{D_A}{2R}.$$

Чем меньше отношение  $D_A/2R$ , тем больший сектор может быть получен в сферической антенне (рис. 412).

Важным параметром сферических антенн является коэффициент использования поверхности полного раскрыва главного сферического зеркала:

$$\text{КИП} = \frac{D_A}{2R \operatorname{cosec} \left( \frac{\Phi_{\max}}{2} - \arcsin \frac{D_A}{2R} \right)}.$$

На рис. 413 представлена зависимость КИП от угла сканирования при различных значениях  $D_A/2R$ . Как видно, минимальное значение КИП для каждого раскрыва получается в том случае, когда используется половина сферы и угол сканирования достигает наибольшей величины.

Для расчета диаграммы направленности двухзеркальной концентрической антенны необходимо знать амплитудное и фазовое распределения. Для их расчета рассмотрим рис. 414, на котором показан ход луча  $OABC$  из источника, расположенного в вершине главного зеркала. Из рисунка следует, что угол падения волны на поверхность главного зеркала (относительно нормали) равен углу, который образует с осью луч, идущий из точки  $O$ . Ордината точки пересечения луча  $OABC$  с раскрывом, проходящим через центр сферы,

$$x_C = R \sin 2\gamma - R \cos 2\gamma \operatorname{tg} \varphi,$$

где  $\varphi = 2\gamma - \theta$ ,

а  $\gamma = \arcsin \left[ \frac{\sin \theta}{\beta} \left( \cos \theta - \sqrt{\beta^2 - \sin^2 \theta} \right) \right]$ .

Для расчета амплитудного распределения необходимо (рис. 415) оценить, как меняется

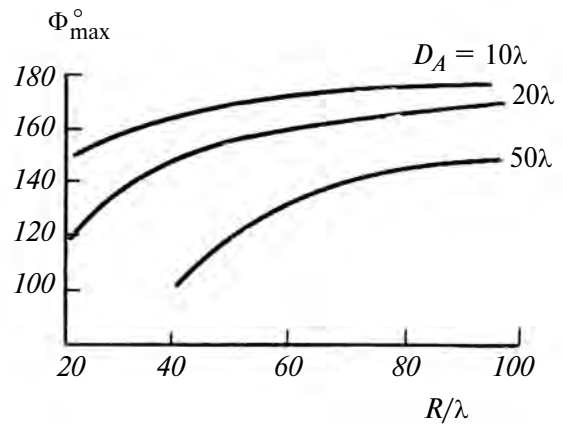


Рис. 412

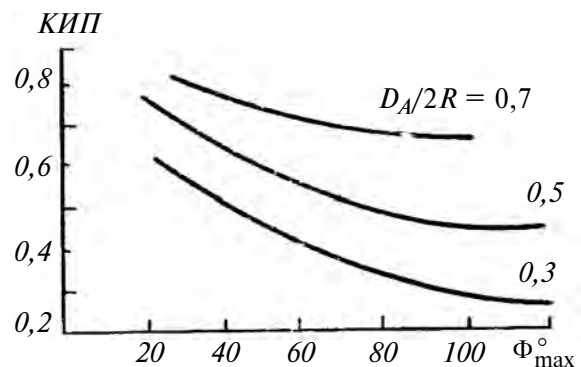


Рис. 413

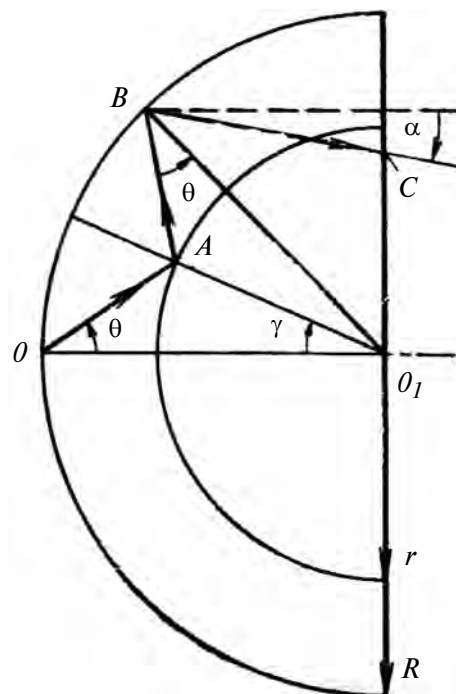


Рис. 414

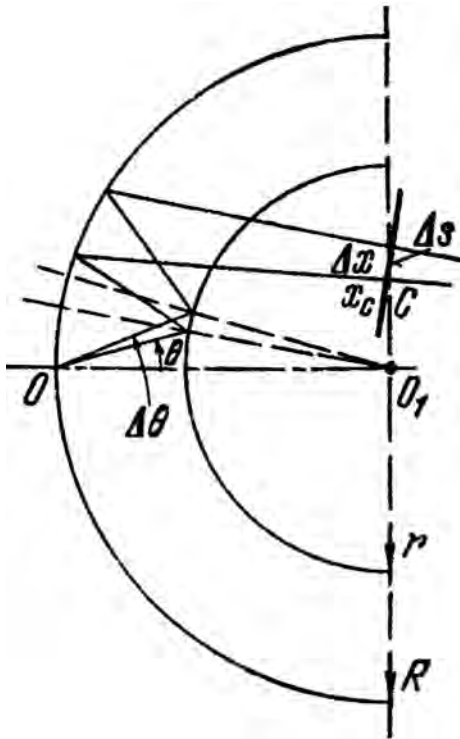


Рис. 415

поток мощности через единичную площадку раскрыва в зависимости от угла  $\theta$ . Это изменение потока можно охарактеризовать величиной  $\frac{1}{s}$ , где  $s = \frac{dx_C}{d\theta} \cos \varphi$ .

На рис. 416 приведено семейство кривых, показывающих зависимость величины  $s$  от угла облучения  $\theta$  при различных значениях параметра  $\beta$ .

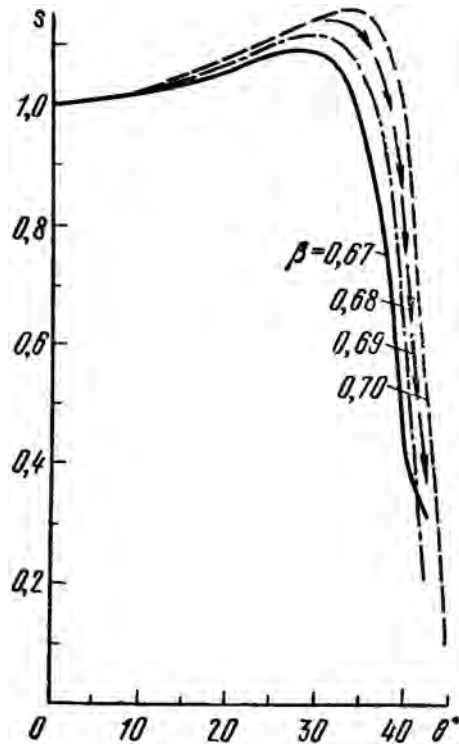


Рис. 416

Амплитудное распределение можно найти, умножив функцию, описывающую диаграмму направленности облучателя, т. е.  $|E(\theta)|$  на величину  $\sqrt{1/s}$ .

Расчет диаграммы направленности сферической концентрической антенны, после того как найдено амплитудное и фазовое распределения, может быть произведен обычными методами, например апертурным методом.

## ПЕРИСКОПИЧЕСКИЕ АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ — ХОРОШО ЗАБЫТОЕ СТАРОЕ

В системах радиорелейной связи для увеличения дальности действия УКВ станций их антенны необходимо устанавливать на башнях или мачтах значительной высоты. Например, антенны радиорелейных линий прямой видимости устанавливаются обычно на опорах высотой 120 м. Питание антенн при этом осуществляется с помощью длинных коаксиальных или волноводных линий передачи, что приводит к усложнению эксплуатации радиорелейных линий. Применение перископических антенных систем устраняет необходимость применения длинных линий передачи энергии. Перископическая антенная система состоит из нижнего зеркала — излучателя, расположенного на земле, и верхнего зеркала — переизлучателя, установленного на опоре. Нижнее зеркало может размещаться как непосредственно у подножия опоры (рис. 417), так и на значительном удалении от нее (рис. 418). Используется вариант построения перископической системы с нижним зеркалом, выполненным по схеме с вынесенным облучателем (рис. 419). При этом облучатель нижнего зеркала устанавливается непосредственно в техническом здании рядом с аппаратурой. Такая схема построения перископической антенной системы позволяет полностью исключить высокочастотный тракт питания вне помещения.

Такова логика и схемы перископических систем радиорелейных линий, которые были разработаны и всесторонне исследованы в свое время школой профессора Г. З. Айзенберга в НИИ-100

(сейчас НИИР), ныне практически уже не существующей.

Рассмотрим теперь рис. 420, *а, б, в*, на котором показана одна из обзорных антенн современного зенитно-ракетного комплекса (с-300), поднятая над поверхностью земли, чтобы иметь возможность обнаружения целей, летящих на сверхмалых высотах с огибанием неровностей земли и других препятствий. Совершенно очевидно, что такая конструкция абсолютно беззащитна не только от прямого попадания противорадиолокационной ракеты противника, но и от малейших осколков такой ракеты. Да и подъем при такой конструкции подъемника не превышает 20—25 метров от поверхности земли. Между тем использование принципов и техники перископических антенн радиорелейных линий может, по крайней мере в некоторых случаях, существенно повысить качество обзора и живучесть ЗРК в целом. На рис. 421 схематически представлен вариант использования принципов перископической антенны и лучевого волновода. Здесь 1 — поверхность перископического зеркала, которое осуществляет круговое или секторное сканирование вокруг вертикальной оси; 2 — опорная мачта, выполненная в виде трубы решетчатой конструкции, которая играет роль лучевода; 3 — основная излучающая антенна, к которой может оперативно подключаться аппаратура РЛС, размещаемая в грузовике *б*. Свойства лучевого волновода позволяют достаточно просто

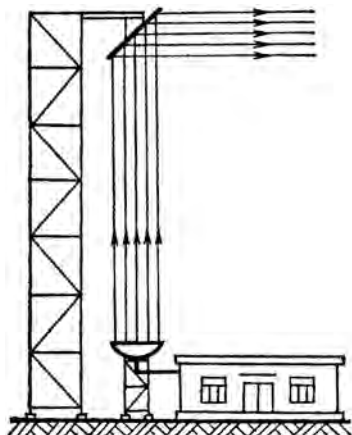


Рис. 417

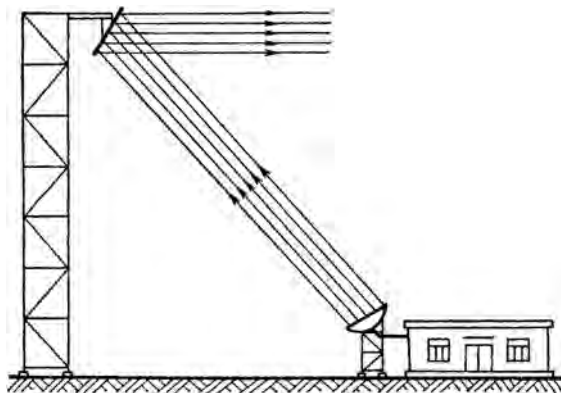


Рис. 418

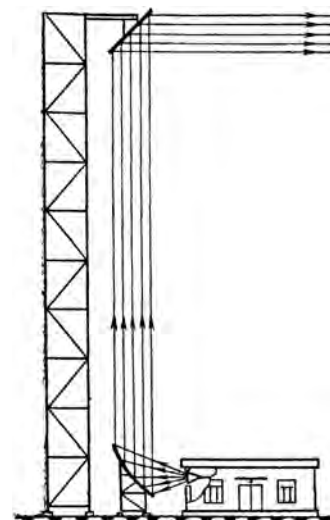


Рис. 419



Рис. 420, а



Рис. 420, б



Рис. 420, в

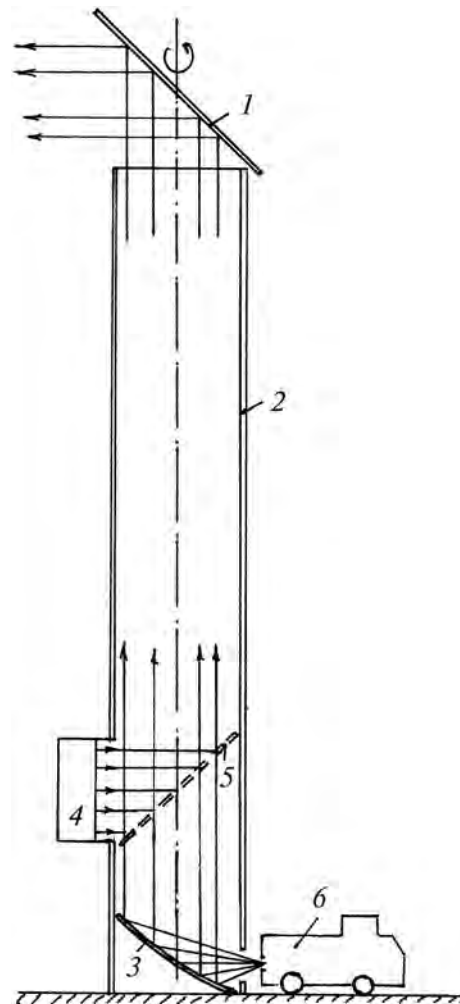


Рис. 421

подключать еще и другую аппаратуру с другой частотой и/или поляризацией с помощью частотно- или поляризационно-селективного рефлектора 5; 4 — условно показана соответствующая дополнительная аппаратура.

Вполне очевидно, что сканирующему рефлектору 1 может быть придана необходимая форма для получения, например, косекансной ДН в вертикальной плоскости. Такая конструкция позволит поднять перископическое зеркало несравненно выше, чем в случае рис. 420, вплоть до 100—120 м, что значительно повысит эффективность ЗРК в целом. Достоинством такой системы является и то, что излучающая часть — сам перископ — удален от главного аппаратного комплекса б на значительное расстояние и в случае попадания ракеты типа Шрайк пострадает только верхняя часть мачты, а машина б может просто переехать к другой мачте, если, конечно, позиция оборудована несколькими такими перископическими мачтами. Но это уже дело соответствующих разработчиков: наше дело только напомнить, что новое это часто хорошо забытое старое. Кстати, большая эффективность таких перископических систем показана хотя бы в [3]. Если сканирующий рефлектор на верхушке мачты поместить в небольшой сферический обтекатель, а саму мачту покрыть хотя бы тонко пленкой, то может быть получена конструкция, которая может успешно работать при любой погоде зимой и летом!

## ПЛАСТМАССЫ В КОНСТРУКЦИИ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН И ИХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ

Уже давно никого не требуется убеждать, что пластмассы также органично используются в антенной технике, как и металлы. Но если металлоконструкции уже практически исчерпали свои возможности, то пластмассы по существу еще только начинают входить в широкое применение, учитывая то, что и сами пластмассы и их потенциальные возможности еще далеко не достигли своего предела в самых разных отраслях техники, а тем более в антенной технике.

Пластмассы для зеркальных антенн мы будем рассматривать в двух аспектах: пластмассы чисто конструкционные и пластмассы, сочетающие конструкционные и радиопрозрачные свойства. Это свойства, как нигде в других случаях, сочетаются в двухзеркальных антеннах с поворотом плоскости поляризации, которые среди всех зеркальных антенн имеют наиболее сложную

конструкцию, но и при этом обладают целым рядом весьма полезных свойств.

В настоящее время наиболее широко в конструкциях зеркальных антенн используются стеклопластики, пенополистиролы и пеноуретаны; физико-механические и радиотехнические свойства некоторых из них приведены в следующей таблице.

Следует подчеркнуть, что пластмассы в технике зеркальных антенн могут применяться не только как конструкционные материалы, но и как преломляющие среды, например в зеркально-линзовых антеннах.

В производстве стеклопластиковых антенн могут найти применение следующие материалы: стеклоткани общего назначения используют наиболее распространенное стекловолокно типа Е, но может использоваться также углеродное

Таблица 3

Материал	Удельный вес, <sup>3</sup> г/см <sup>3</sup>	Сопротивление растяжения, <sup>2</sup> кг/мм <sup>2</sup>	Модуль упругости, <sup>2</sup> кг/мм <sup>2</sup>	Удельная прочность, кг	Коэффициент линейного расширения, °С · 10 <sup>-5</sup>	Максимальная рабочая температура, t °С	Морозостойкость, t °С	Диэлектрическая постоянная ε на f = 1 ГГц	tgδ на f = 1 ГГц
Сталь СТ5	7,85	50÷53	21 000	6—5	1,1	—	—	—	—
Дюралюминий Д16	2,7	45	7200	16,5	2,4	—	—	—	—
Стеклопласты: — на основе стеклоткани и смолы ПН-1	1,8	25÷27	2100	15	1,2÷1,5	+150	-250	3÷4	1÷3 · 10 <sup>-2</sup>
— "СВАМ" (10:1) <sup>1</sup>	1,9	90÷95	5800	50	1,6	+150	-250	6÷7	4÷10 · 10 <sup>-3</sup>
Пенополиуретан	0,05±0,5	до 2,5	до 125	до 6,0	6÷8	+100	-60	1,05÷1,5 до 3	6÷8 · 10 <sup>-3</sup>

<sup>1</sup> СВАМ— слоисто-волоконный армированный материал при отношении числа продольных и поперечных слоев 10:1.

Наименование диэлектрика	λ = 30 см		λ = 10 см		λ = 3 см		λ = 0,5 мм	
	ε <sub>r</sub>	tgδ	ε <sub>r</sub>	tgδ	ε <sub>r</sub>	tgδ	ε <sub>r</sub>	tgδ
Плексиглас	—	—	—	—	2,61	8 · 10 <sup>-3</sup>	2,5	4,7 · 10 <sup>-2</sup>
Полистирол	2,55	0,45 · 10 <sup>-3</sup>	2,55	0,5 · 10 <sup>-3</sup>	2,55	0,7 · 10 <sup>-3</sup>	—	5 · 10 <sup>-3</sup>
Кварц плавленный	3,80	—	3,80	1,0 · 10 <sup>-4</sup>	3,80	1,7 · 10 <sup>-4</sup>	3,64	4 · 10 <sup>-3</sup>
Полиэтилен	2,28	0,4 · 10 <sup>-3</sup>	2,26	0,4 · 10 <sup>-3</sup>	2,26	0,5 · 10 <sup>-3</sup>	—	—
Фторопласт-4	2,0	2 · 10 <sup>-4</sup>	—	—	2,08	3,7 · 10 <sup>-4</sup>	—	2 · 10 <sup>-3</sup>
Керамика стеатитовая	5,5	1,5 · 10 <sup>-3</sup>	5,2	—	5,2	3 · 10 <sup>-3</sup>	—	—
Керамика форстеритовая	5,9	5 · 10 <sup>-4</sup>	5,8	—	5,8	10 · 10 <sup>-4</sup>	—	—
Стекло С49-2 (ЗС-5К)	—	—	—	—	5,2	9 · 10 <sup>-3</sup>	5,3	0,122
Стекло С38-1 (ЗС-9)	—	—	—	—	4,2	2,9 · 10 <sup>-3</sup>	—	—
Стекло С48-1 (ЗС-8)	—	—	—	—	4,9	6,5 · 10 <sup>-3</sup>	—	—

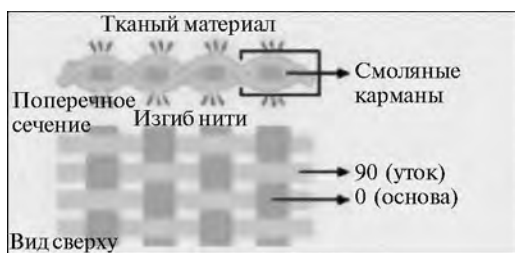


Рис. 422



Рис. 423

и арамидное волокно. Стеклоткани различаются по способу плетения — сатиновые, саржевые, полотняные. По плотности выделяют стеклорогожу и стекловуаль. Типов стеклотканей в настоящее время чрезвычайно много — вплоть до стеклотканей для автомобильных дорог. В конструкции зеркальных антенн и обтекателей могут найти применение мультиаксиальные ткани, состоящие из нескольких слоев нитей, ориентированных в различных направлениях в соответствии с заданной схемой армирования, рассчитанной исходя из оказываемой на материал нагрузки. Слои тканей прошиваются полиэфирной нитью. В дополнение к нескольким слоям волокна в структуру мультиаксиальной ткани может быть добавлена поверхностная вуаль или слой рубленого стекломата. На рис. 422 показана структура однослойной стеклоткани, а на рис. 423 простейшая мультиаксиальная ткань. Известна квадроаксиальная ткань, в которой волокна расположены в четырех направлениях.

Стеклоткань становится стеклопластиком после того, как она будет пропитана одним из полимеризующихся составов. В России наиболее широко используется полиэфирная смола типа ПН-1 МРТУ-6-05-1082—67. Однако в последнее время проявилось много новых смол. Например, акриловые смолы под торговой маркой Modar. Смолы доступны в различных модификациях для ручного формования, технологий инъекции, полтрузии и намотки. Благодаря низкой вязкости смолы легко наполняются различными наполнителями в частности для придания огнестойких свойств, благодаря чему удается обеспечить соответствие наиболее строгим требованиям по огнестойкости даже для применения на пассажирском транспорте.

Российские заводы производят конструкционную стеклоткань общего применения следующих марок: ССТЭХ90 ГОСТ 8481—61, ТСЖ-0,7 МРТУ 6-05-899—63.

В процессе изготовления стеклопластиков широкое применение находят ровинги, которые представляют собой тонкий жгут, собранный без скручивания из отдельных параллельных стекловолокон. Использование ровингов открывает возможности механизации ряда процессов изготовления многих стеклопластиковых изделий.

К сожалению, стеклопластиковые технологии требуют большого объема ручного труда, который плохо поддается механизации, что связано также со сравнительно небольшим количеством выпускаемых антенн, а также слабым знакомством разработчиков антенн с современными материалами и технологиями, например, в области автомобиле- и кораблестроения. Между тем, в мире последнее время появился целый ряд фирм и технологий, позволяющих в значительной мере отказаться от ручного труда при изготовлении пластиковых антенн. Например, фирма Glas-Craft (USA) поставляет оборудование для производства стеклопластика методом напыления. На рис. 424 показана схема работы установки указанной фирмы. Жгут ровинга автоматически рассекается на небольшие отрезки заданного размера — чопсы длиной  $0,8 \div 5$  см. После резки части волокна попадают в струю полиэфирной смолы из распылительного пистолета и пропитываются ею во время переноса на матрицу. При этом не требуется производить раскрой стеклоткани и подготовку смеси полиэфирная смола—отвердитель, увеличивается скорость производства изделий и упрощается контроль качества изделий. Существует также методика инъекции полиэфирных смол в смеси с ровингом в закрытую форму. Специальная смесь смолы и рубленого ровинга — гелькоут — используется в режиме напыления. Отделочный гелькоут применяется для формирования высококачественной глянцевой внешней поверхно-

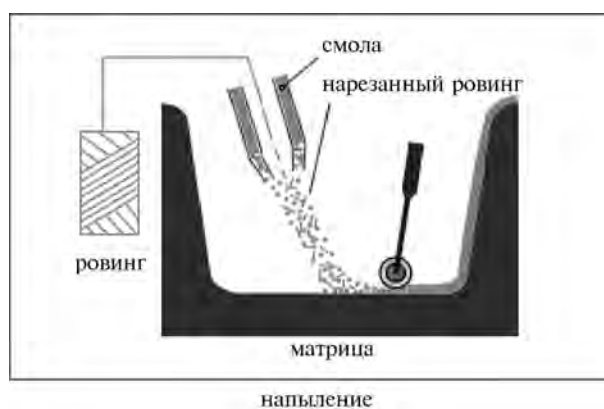


Рис. 424

сти необходимого цвета. Гелькоут в жидком виде наносится на изделие и при отверждении образуются связанные полимеры, армированные стеклоили углеволокном. Специализированные матричные гелькоуты могут использоваться для изготовления матриц, которые в свою очередь используются для изготовления самих изделий. Известен также барьеркоут, представляющий собой дополнительный слой (наносится под гелькоут), защищающий изделие от воздействия воды, особенно морской и придающий изделию особый глянец. Наконец, существует топкоут, который наносится на готовое изделие для создания декоративного слоя. Соответствующую аппаратуру для нанесения гелькоутов производит, например, фирма Ashland и ряд других. Большое количество различных фирм-производителей и поставщиков оборудования для судостроения и автостроения можно найти в интернете и все эти достижения применить для создания прекрасных современных антенн. Кстати, можно подобрать и такие материалы, которые обладают неограниченным достоинством для аппаратуры военного назначения — негорючесть и высочайшую прочность при сохранении радиопрозрачности — вспомнить хотя бы пуленепробиваемые стекла бандитских мерседесов (!) и бронежилеты.

Кроме монолитных стеклопластиков в антенной технике необходимы легкие материалы с высокой прочностью и низкими электрическими потерями, пригодные для создания искусственных диэлектриков с заданной диэлектрической проницаемостью. Такими свойствами обладают различные пенопласты. Наиболее известны из них пенополистирол и пенополиуретан. В последнее время появились ПВХ-пенопласты, например, фирмы Diab (Швеция). Группа листовых пенопластов на ПВХ-основе используется как материал сердцевины для производства прочных, жестких и легких сэндвич-структур, состоящих из двух тонких прочных облицовочных пластин — обшивки и толстой легкой сердцевины — заполнителя из ПВХ-пенопласта, разделяющей несущие пластины и распределяющей нагрузку между ними. Адгезионные слои связывают пластины с заполнителем и передают нагрузку от заполнителя к облицовке и обратно. Считается, что ПВХ-пенопласты имеют самое низкое водопоглощение и высокую пожаробезопасность.

Наконец, изготовление стеклопластиков невозможно без разделительных (антиадгезионных) составов, которые разделяют изделие и матрицу и обеспечивают съем изделия с матрицы без чрезмерных усилий и без каких-либо разрушений. Наряду с обычными разделителями на основе поливинилового спирта в настоящее время появились разделители на восковой основе, например, Blue Wax 333-MR и полимерные разделители, например, Zyvac и Flex Z, ко-

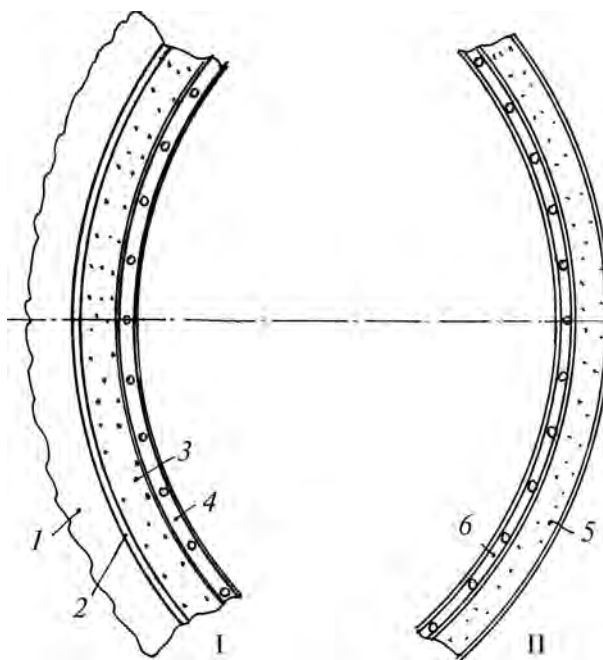


Рис. 425

торые могут наноситься на матрицу при помощи распылителей.

Определившись в основном со стеклопластиковыми, перейдем теперь к вопросам реализации зеркальных антенн на базе этих материалов. На рис. 425 показано сечение главного I и вспомогательного зеркала II. Здесь 1 — стеклопластиковый или металлический массив, обеспечивающий основную механическую прочность всей конструкции и служащий для крепления антенны к опорно-поворотному устройству; 2 — отражающая поверхность: если 1 — это металл, то 2 — это просто его внутренняя поверхность, а если 1 — это массив стеклопластика, то 2 — это либо тонкая металлическая фольга, либо слой краски с металлической пудрой, либо металлизированная стеклоткань марки СМСМТ ТУ 6-11-171—70 или ей подобные.

Четвертьволновый слой 3 должен обладать максимальной радиопрозрачностью и выполняется либо из сотового стеклотекстолита, либо из пенополиуретана. Слои 4 и 6 являются функциональными — они обеспечивают поляризационные характеристики антенны и представляют собой однолинейные сетки тонких проводов, образующие между собой угол  $45^\circ$ . Для реализации этих сеток используется обычно специальная стеклоткань, одна нить которой металлизирована и повторяется с определенным шагом в пределах всего полотна. Слой 5 также как и слой 3 должен иметь максимальную радиопрозрачность и одновременно он должен обеспечивать достаточную прочность вспомогательного зеркала. Антенны ряда зенитно-ракетных комплексов, как это видно из раздела, посвящен-



Рис. 426

ного применению антенн в современных РЛС, выполнены по такой технологии. Это объясняется тем, что стеклопластиковые двухзеркальные антенны не только имеют хорошие радиотехнические характеристики, но и обеспечивают высокую степень защищенности антенны от поражающих воздействий, и имеют вполне благопристойный внешний вид, например как на рис. 426.

Теперь некоторые соображения по поводу особенностей технологии изготовления антенн с поворотом плоскости поляризации. Если главным функциональным элементом антенны является стеклоткань с металлической сеткой, то главной проблемой становится укладка плоской стеклоткани на криволинейную поверхность без складок и разрывов (вспомните картографическую проекцию), что неизбежно приводит к нарушению параллельности проводников на поверхности зеркал, а тем самым и к поляризационным потерям, тем более, если такая укладка производится вручную и зависит от квалификации и аккуратности работника. Другим источником возможных искажений является эпоксидная смола — вязкий и весьма неудобный материал, да к тому же и канцерогенный.

Более адекватный путь — отказ от широких полотнищ стеклоткани и укладка узких лент, содержащих проволочную сетку, с помощью специализированных станков с программным управлением. В этом случае можно добиться укладки без складки и разрывов при минимальных поляризационных потерях.

Однако, наиболее адекватным решением, несомненно будет переход к методам фотолитографии, а именно к технике изготовления печатных плат. В этом случае на металлизированную поверхность методом фотолитографии наносится серия дорожек опять же по специальной программе с учетом реальной кривизны поверхностей. В результате после травления можно получить практически идеальные поляризационные характеристики антенны. Это особенно актуально для перехода в мм диапазон волн. Сложно? Да, сложно, но... хочешь мира, готовься к войне. Ведь недаром нас постоянно тычут носом, что у нас никудышная связь и дохлая радиолокация!

Незаслуженно мало уделяется внимания созданию защитных обтекателей для антенн поиска и обнаружения целей для таких ЗРК как, например "Тунгуска": когда видишь как беспрерывно "мotaется" ее антенна на марше, невольно осознаешь ее незащищенность и уязвимость. Между тем, стоило бы только спрятать антенну под сравнительно небольшой стеклопластиковый обтекатель, как сразу же уменьшились бы нагрузки на антенну, и возросла ее надежность и стойкость в боевых условиях, да и сама "мotaющаяся" антенна не так бросалась бы в глаза постороннему наблюдателю. Сверхпрочные и негорючие стеклопластики позволят создать надежную защиту для такого весьма уязвимого элемента РЛС как ее антенна в боевых условиях. Стеклопластиковые укрытия могут не только эффективно защитить, но и спрятать антенный комплекс ЗРК, имитируя совсем безобидные предметы, например, стог сена или хлебный фургон!

Наконец, пластмасса может быть чрезвычайно полезна при эксплуатации любых зеркальных антенн в условиях сурового российского климата, особенно в северных регионах, когда снег и лед выводят из строя аэродромные комплексы, как это видно на рис. 131 и 132. А между тем уже давно разработаны методы борьбы с этим бездействием. Так, американская фирма Clear-Sat предлагает покрытие для спутниковых антенн, предотвращающее налипание снега на их поверхность. Влага, содержащаяся в налипшем снеге, приводит к рассеиванию сигнала и, соответственно, снижению его уровня в фокусе антенны. Налипание большого количества снега может также привести к сдвигу антенны. Эффективность защиты от снега и льда, обеспечиваемая предлагаемым покрытием, составляет 95%. В то же время оно в 10 раз дешевле систем, обеспечивающих полную защиту.

Покрытие также снижает разрушительный эффект от воздействия тепловых и ультрафиолетовых лучей. Тепловые лучи, собираясь в фокусе антенны, нагревают конвертор, повышая уровень шума. Концентрация ультрафиолетовых лучей может привести к повреждению компонентов конвертора. Структура покрытия разработана таким образом, что солнечные лучи отражаются от него не в фокус, а назад в направлении солнца. В то же время спутниковые сигналы отражаются от него так же, как от непокрытой поверхности антенны. Практика эксплуатации покрытия показала, что оно не дает ни малейшего ослабления спутникового сигнала.

Покрытие представляет собой полиэстеровую сетку, ламинированную двойным слоем винила. Винил препятствует задержке влаги и налипанию снега, а полиэстеровая сетка обеспечивает высокую прочность покрытия. В обычных условиях покрытие должно прослужить 5—7 лет.



## СОВМЕЩЕНИЕ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ И ОБТЕКАТЕЛЯ

Схемы двухзеркальных антенн с поворотом плоскости поляризации, в которых главное и вспомогательное зеркала близки по размерам, вполне пригодны для использования техники радиопрозрачных обтекателей, что позволяет объединить в одно конструктивное целое оба зеркала и получить конструкцию барабанного типа. Такая конструкция характерна, например для антенны ЗРК "Шилка" и "Тунгуска" (рис. 427, а, б). Однако в этом случае происходит скорее механическое объединение двух зеркал, а полученная конструкция не является обтекателем в строгом смысле этого слова, т. к. не осуществляется укрытие механизмов вращения и угломестного поворота антенны.

Наиболее адекватной является конструкция замкнутого тороида для сканирования на  $360^\circ$  в горизонтальной плоскости. На рис. 85 была показана тороидальная антенна, поверхность которой образована системой параллельных металлизированных нитей, проволок или металлизированных дорожек как на печатных платах. Проводники ориентированы под  $45^\circ$  к оси тороида. Практическая реализация антенн в виде замкнутого тороида возможна в виде конструкции, представленной на рис. 428. Здесь 1 — параболический профиль — образующая тороида,

2 — круговое сечение — внутренняя поверхность тороида и одновременно внутренняя поверхность обтекателя, на наружной поверхности которого нанесены проводники; 3 — на лицевой поверхности, 4 — на тыльной. Облучатель 5 или группа облучателей по количеству и угловому размеру обслуживаемой зоны вращается с помощью сочленения 6 вдоль фокальной дуги 9, радиус которой  $R_2$  является фокусным расстоянием параболического сечения тороида, причем

$$R_2 \cong \frac{1}{2} R_1.$$

Объем тороида ограничен сверху крышкой 10, а снизу основанием 11. Обтекатель 7 может быть изготовлен из стеклопластика по методике и из материалов, рассмотренных в предыдущем разделе с использованием защитного покрытия 8. Реальный замкнутый тороид из стеклопластика может иметь вид как на рис. 429. Такая конструкция может быть вполне подходящей для реализации, например, наддулочной вертолетной антенны, показанной на рис. 187 и 188.

Частным случаем замкнутого тороида может быть представленный на рис. 430 плоский замкнутый круговой коллиматор, по периметру которого расположена лента 1 и 4 с металлическими проводами, как и на рис. 428. Здесь проводники 2,



Рис. 427, а



Рис. 427, б

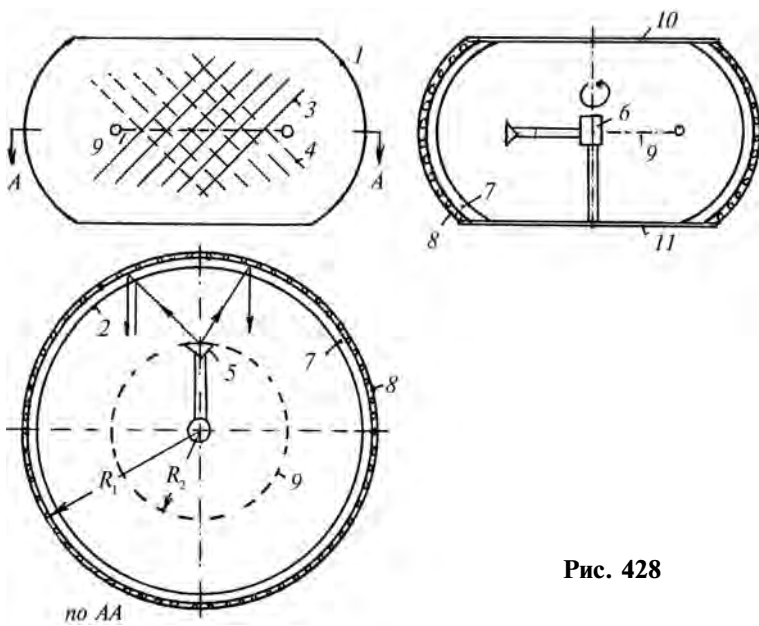


Рис. 428



Рис. 429

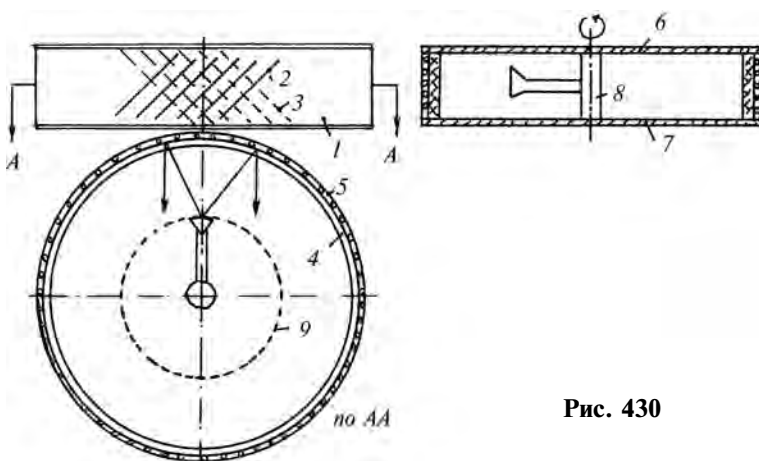


Рис. 430

расположенные на лицевой стороне, а 3 — на тыльной стороне коллиматора. На внешней стороне ленты нанесено защитное покрытие 5. 6 и 7 — крышки коллиматора, 8 — вращающееся сочленение, 9 — фокальная кривая. Очевидно, такой коллиматор будет иметь узкую ДН в горизонтальной плоскости и широкую в вертикальной, что оптимально для РЛС кругового обзора. В процессе работы антенна остается неподвижной, а вращается только облучатель (или система облучателей); при этом и сама облучающая система полностью изолирована от внешней среды и от постороннего наблюдения на пограничной или охраняемой территории.

В схеме тороида на рис. 428 оси параболических образующих лежат в плоскости симметрии тороида и поэтому максимум ДН антенны также лежит в этой плоскости, а ДН имеет форму, близкую к карандашной. Однако, возможны варианты, в частности может быть реализована схема, в которой ось параболической образующей наклонена относительно фокальной точки. В этом случае может быть получена ДН, близкая по форме к двойному косекансу. Кроме параболической образующей в конструкции тороида может, например, использоваться профиль антенны с ДН типа  $\text{cosec}^2\theta$  как на рис. 95, а.

Замкнутая тороидальная антенна может быть реализована в надувном варианте с использованием специальной оболочки, на поверхности которой нанесены проводящие линии в виде проводов. В результате может быть получена легкая антенна, удобная для быстрого развертывания и свертывания на специальной мобильной платформе. В случае раскрашивания оболочки в камуфляжные цвета антенна может использоваться и для оперативной деятельности. Как говорится, все могут короли, т. е. зеркальные антенны!

# СОДЕРЖАНИЕ

---

О терминах и определениях . . . . .	3
Параболический цилиндр и волноводные коллиматоры . . . . .	6
Простые монозеркальные антенны . . . . .	14
Модифицированные монозеркальные антенны . . . . .	36
От оптических телескопов к зеркальным антеннам . . . . .	49
Зеркальные антенны в современных РЛС . . . . .	52
Зеркальные антенны в космических проектах . . . . .	79
Теория аберраций и сканирование . . . . .	90
Понятие об аберрациях . . . . .	90
Условие синусов . . . . .	92
Условие изоапланатизма . . . . .	95
Условие косинусов . . . . .	96
Расчет волнового фронта двухзеркальной антенны в режиме приема и передачи . . . . .	98
Графический метод определения формы волнового фронта при сканировании . . . . .	102
Определение центра излучения антенны при сканировании . . . . .	103
Определение направления максимального излучения при сканировании . . . . .	106
Классические двухзеркальные антенны . . . . .	110
Апланатические зеркальные антенны. Апланаты по Д. Д. Максудову . . . . .	115
Апланаты по Э. Аббе. Точные формулы . . . . .	117
Апланаты как сканирующие антенны. Методика исследования . . . . .	121
Расчет волновых фронтов и диаграммы направленности . . . . .	124
Расчет ДН апланата токовым методом . . . . .	127
Возможности апланатов как сканирующих антенн . . . . .	129
Антенна ЗРК "Круг" — самый тонкий апланат . . . . .	133
Апланат с 90-градусным сектором сканирования . . . . .	134
Апланат для доплеровских измерителей скорости и угла сноса (ДИСС) . . . . .	135
Апланат — анастигмат . . . . .	139
Двухзеркальные неосесимметричные антенны. Схемы и варианты использования . . . . .	141
Неопланаты . . . . .	143
Неопланат "Раковина" . . . . .	151
Двухзеркальные антенны с трансформацией раскрытов — ТР-антенны . . . . .	157
Бифокальные апланаты . . . . .	161
Суперапланаты — перспективы . . . . .	171
Коммутационные и многолучевые антенны — оптимизация . . . . .	175
Апланат с дополнительными участками на вспомогательном зеркале . . . . .	177
Сферические зеркальные антенны . . . . .	179
Двухзеркальные сферические антенны с корректирующим зеркалом . . . . .	181
Двухзеркальные концентрические антенны . . . . .	189
Перископические антенные системы — хорошо забытое старое . . . . .	195
Совмещение зеркальной антенны и обтекателя . . . . .	201

## БИБЛИОГРАФИЯ

---

1. **Максутов Д. Д.** Астрономическая оптика. 1979.
2. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. 1973.
3. **Айзенберг Г. З.** Антенны УКВ. Т. 2. 1977.
4. **Корнблит С.** СВЧ оптика. 1980.
5. **Хансен.** Сканирующие антенные системы СВЧ. 1969.
6. **Галимов Г. К.** Авторское свидетельство № 20308 с приоритетом от 4 окт. 1958 г.
7. **Галимов Г. К.** Удостоверение на рац. предложение, принятое предприятием п/я 44 к внедрению. 25 мая 1961 г.
8. **Галимов Г. К.** Авторское свидетельство № 23549 с приоритетом от 18 ноября 1960 г.
9. **Галимов Г. К.** Авторское свидетельство № 1389 Апланатическая двухзеркальная антенна. 6 сент. 1962 г.
10. **Галимов Г. К.** Авторское свидетельство № 27516. 16 марта 1964 г.
11. **Галимов Г. К.** Авторское свидетельство № 462555 28 ноября 1972 г. Бифокальная двухзеркальная антенна.
12. **Галимов Г. К.** Авторское свидетельство № 455698 19 ноября 1972 г. Двухзеркальная концентрическая антенна.
13. **Галимов Г. К.** Авторское свидетельство № 669441 от 28 дек. 1977 г. Металловоздушная линза.
14. **Бахрах Л. Д., Галимов Г. К.** "Зеркальные сканирующие антенны". М., "Наука", 1981 г.
15. **Калошин В. А., Фролова Е. В.** "Моделирование"... Журнал радиоэлектроники. 2007, № 6 и № 7.
16. **Попов Г. М.** "Современная астрономическая оптика". 1988.