

## Лекция 11.

## ЗЕРКАЛЬНЫЕ И ЛИНЗОВЫЕ АНТЕННЫ

## 11.1. Облучатели параболических антенн

От элементарных излучателей, установленных в фокусе параболической антенны, перейдём к реальным облучателям. Всегда стремятся к тому, чтобы диаграммы направленности облучателя в Е- и Н-плоскостях были одинаковы, а поляризационные характеристики совпадали с поляризационными характеристиками элемента Гюйгенса. Первым таким облучателем был рупор Поттера, изображённый на рис.11.1. Внизу на этом рисунке показана его диаграмма направленности.

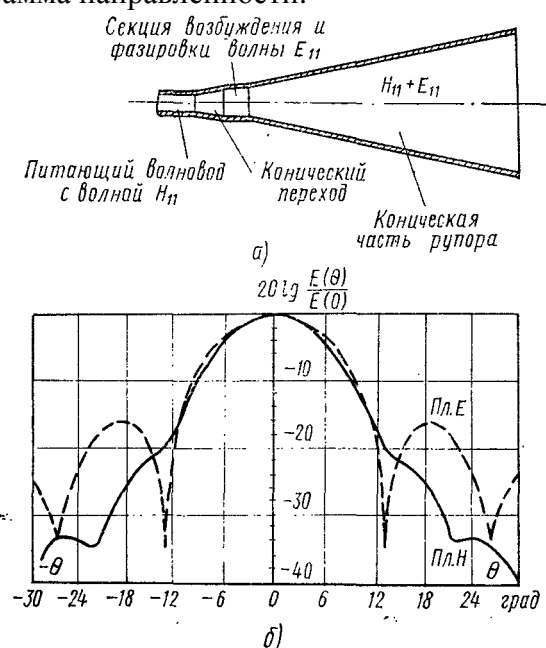


Рис. 11.1. Рупор Поттера и его диаграмма направленности

Чтобы сформировать нужную диаграмму направленности в этом рупоре кроме волны основного типа  $H_{11}$  в рупоре возбуждалась волна высшего типа  $E_{11}$ . Сумма этих волн обеспечивала в пределах угла облучения параболоида практически одинаковые диаграммы направленности в плоскостях Е- и Н-. К недостаткам этого рупора можно отнести его узкополосность, определяемую тем, что в рабочей полосе частот необходимо было выдержать амплитудно-фазовые соотношения двух типов волн, имеющих разные дисперсионные характеристики.

Этот недостаток был преодолён в гофрированных (ребристых) рупорах, показанных на рис. 11.2.

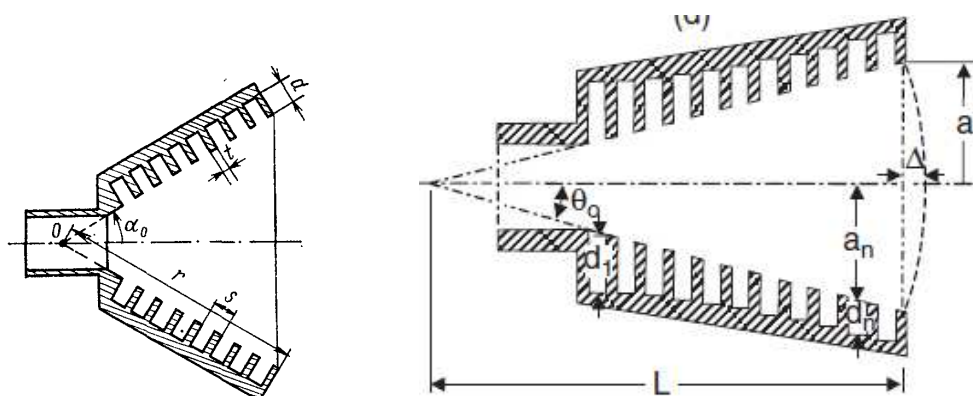


Рис.11.2. Варианты конструктивного исполнения гофрированных рупоров

Применение рупоров с гофрированной боковой поверхностью позволяет в достаточно широкой полосе частот получить такую же поляризационную характеристику поля излучения, как у элемента Гюйгенса. Для этого глубина канавок делается близкой к четверти длины волны. Недосток такого рупора – его высокая стоимость, определяемая повышенной трудоёмкостью изготовления.

С помощью рупора трудно сформировать широкую диаграмму направленности. Для формирования широких диаграмм направленности применяют облучатели типа открытого конца волновода, с излучающей апертурой, близкой по размеру к поперечному размеру волновода. Некоторые варианты конструктивного исполнения таких облучателей показаны на рис.11.3.

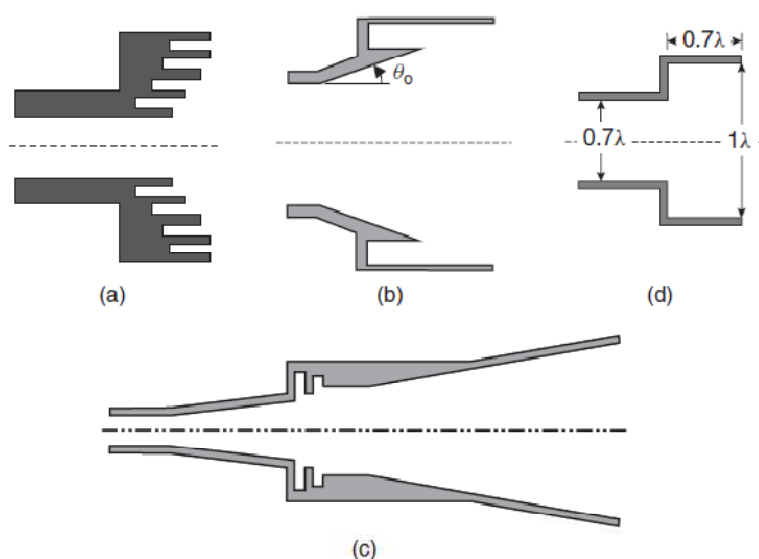


Рис. 11.3. Облучатели типа открытого конца волновода

Канавки в облучателях (a) и (b) играют, примерно, ту же роль, что и в гофрированных рупорах. Физически формирование в таких облучателях диаграмм направленности с одинаковой шириной в Е- и Н- плоскостях обычно объясняют запиранием продольных вытекающих токов в Е-плоскости четвертьволновой канавкой. В облучателях (d) и (c), подобно рупору Поттера, возбуждается волна высшего типа для выравнивания ширины диаграмм направленности в Е- и Н- плоскостях.

## 11.2 Двухзеркальные параболические антенны Кассегрена и Грегори

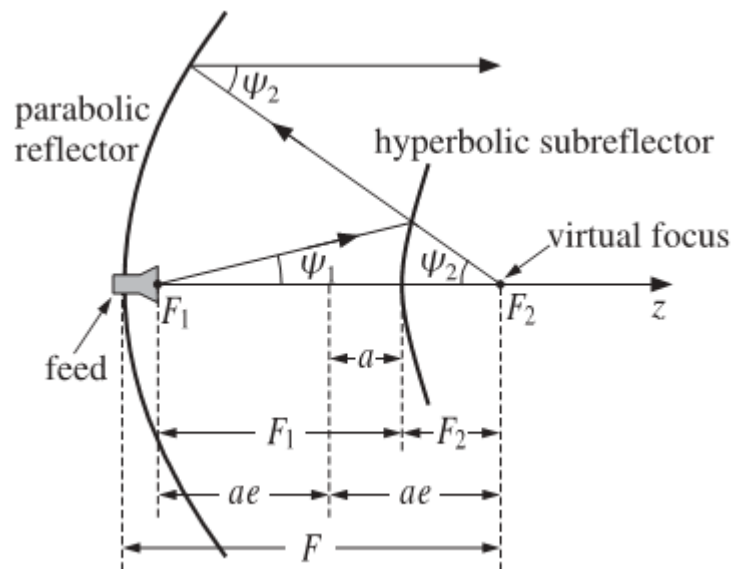


Рис.15.8 Ход лучей в антенне Кассегрена

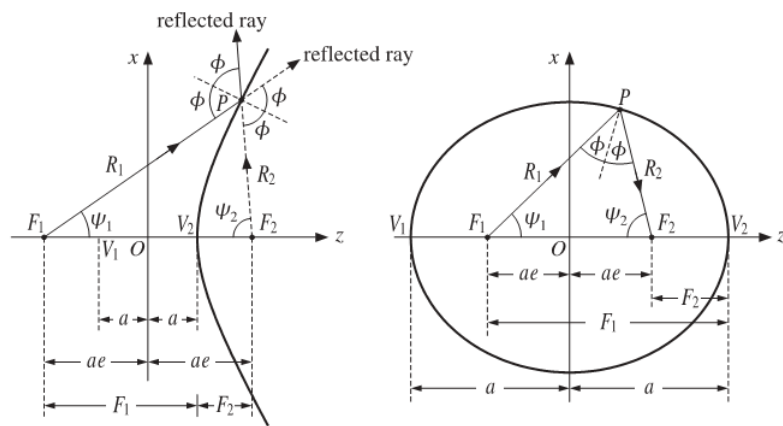


Рис. 11.4. Оптические свойства гиперболы и эллипса

### 11.3. Факторы, определяющие эффективность параболических антенн

В одной из предыдущих лекций было показано, что коэффициент направленного действия (КНД) в максимуме диаграммы направленности идеальной апертурной антенны определяется формулой:

$$D = \frac{4\pi S_g}{\lambda^2},$$

в которой  $S_g$  - геометрическая площадь апертуры (раскрыва) антенны. В технике зеркальных антенн чаще пользуются понятием коэффициента усиления (КУ), (англ. "GAIN"), определяемого формулой:

$$КУ = \frac{4\pi S_{ef}}{\lambda^2}.$$

Отношение  $S_{ef}/S_g$ , характеризующее эффективность антенны, называют **коэффициентом использования площади** (КИП) апертуры антенны. Одна составляющая эффективной площади, а, следовательно и КИП, была определена в лекции 9, формулой (9.6.б). Эту составляющую, определяемую распределением поля по апертуре, называют **апертурным КИП**.

$$KИП_a = \frac{S_{eff}}{S_g} = \frac{\left| \iint_S E_0(x, y) dx dy \right|^2}{\iint_S dx dy \iint_S |E_0(x, y)|^2 dx dy}$$

Снижение эффективности зеркальной антенны зависит также от других факторов: доли мощности облучателя, не попадающей на зеркало, влияния затенения апертуры опорными конструкциями, поддерживающими облучатель или вспомогательное зеркало, отличия формы зеркал от теоретической, точности совмещения фазового центра облучателя с фокусом, потерь в облучателе и фидерном тракте и некоторых других.

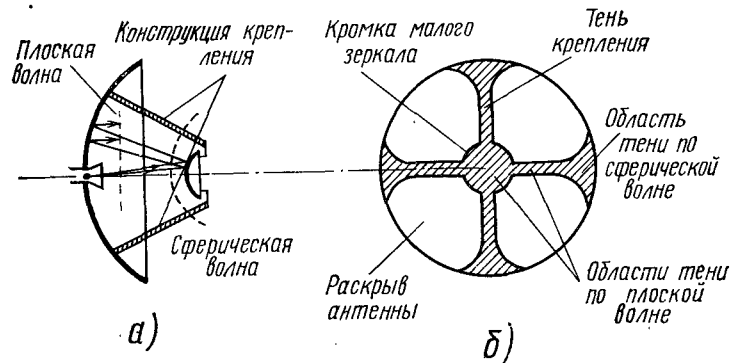


Рис. 11.5. Затенение апертуры в двухзеркальной антенне

#### 11.4. Шумовая температура приёмных антенн.

Эффективность приёмных антенн кроме КИП зависит ещё от мощности шума на выходе антенны. Согласно формуле Найквиста, мощность шума на выходе линейного устройства может быть охарактеризована шумовой температурой:

$$P_{ша} = kT_a \Delta f$$

В этой формуле  $k$  - постоянная Больцмана,  $\Delta f$  - частотная полоса сигнала. Антенна принимает космические и промышленные шумы. Увеличение шума связано с прохождением электромагнитной волны через поглощающие среды или устройства.

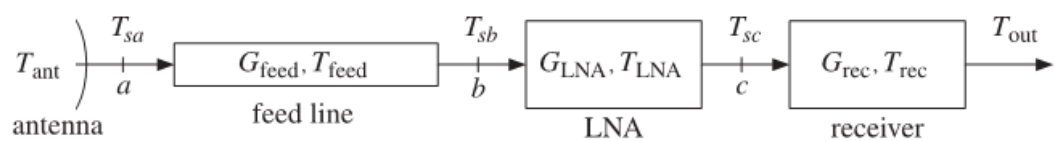


Рис. 11.6. К расчёту шумовой температуры антенны

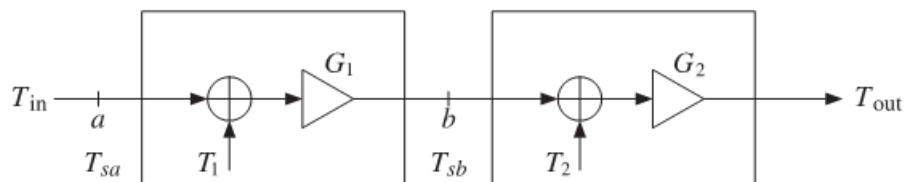


Рис. 11.7. Влияние последующих усилительных каналов на шумовую температуру

Если волна проходит через какое-то устройство или поглощающую среду, имеющую физическую температуру  $T_0$  и характеризующуюся коэффициентом полезного действия  $\eta$ , то шумовую температуру на выходе устройства можно рассчитать по формуле:

$$T_{out} = \eta T_{in} + (1 - \eta) T_0$$

Таким образом, шум на выходе антенны определяется не только принимаемым космическим и промышленным шумом, но и потерями, а следовательно, и состоянием атмосферы, поглощением сигнала при отражении от зеркал, потерями в облучателе и фидерном тракте.

### 11.5. Разновидности параболических зеркальных антенн.

Чтобы исключить потери эффективности антенны из-за затенения излучающей апертуры облучателем, вспомогательным зеркалом и их опорами, в качестве рефлектора используют неосесимметричную вырезку из параболоида вращения, как показано на рис. 15.3.

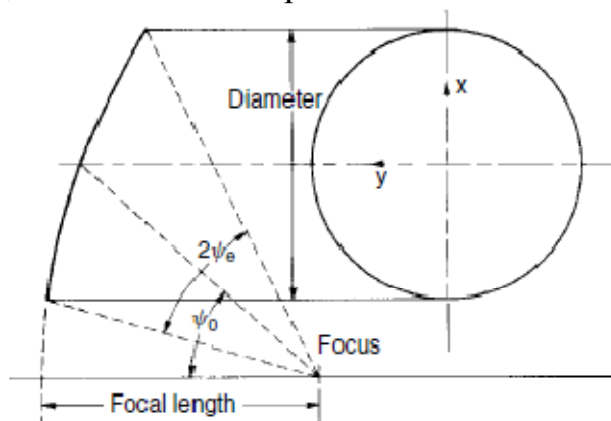


Рис. 11.8. Однозеркальная параболическая антенна с вынесенным фокусом (offset).

К недостаткам такой антенны можно отнести появление в ней зон с кроссполяризованным излучением даже при использовании линейно поляризованного идеального облучателя типа элемента Гюйгенса. В антенне этого типа с излучением круговой поляризации происходит смещение положения максимума диаграммы направленности из плоскости симметрии. Компенсация этих эффектов возможна в несимметричной двухзеркальной антенне. Такая антенна с эллиптическим контррефлектором типа Грегори показана на рис. 11.9.

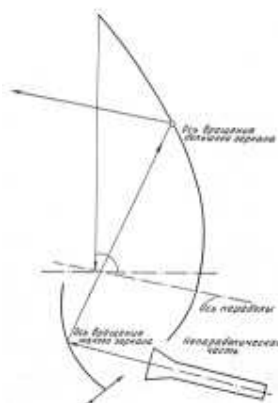


Рис. 11.9. несимметричная двухзеркальная антенна Грегори.

В антенной технике в качестве фокусирующих рефлекторов применяются не только параболоиды вращения, но и образованные из параболического цилиндра. В этих антеннах фокус не точечный, а образован линейным отрезком оси, вдоль которого располагают линейную решётку излучателей, как схематично показано на рис. 11.10.

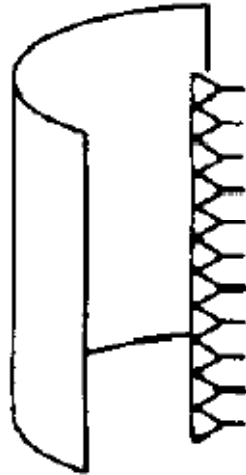


Рис. 11.10. Антенна типа параболический цилиндр.

Антенна такого типа применялась на космическом радиолокаторе бокового обзора, созданном в ОКБ МЭИ для исследования поверхности Венеры (рис. 11.11.)

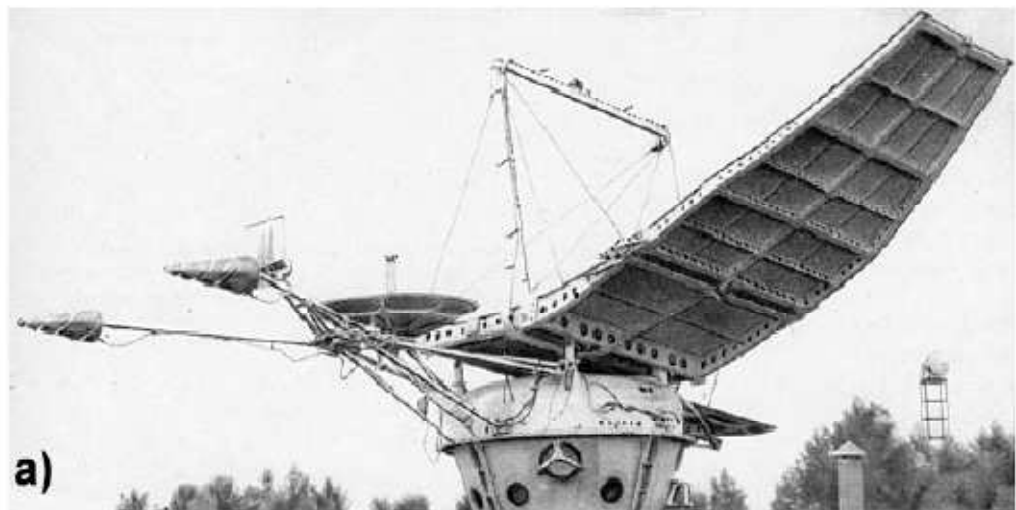


Рис. 11.11. Раскрывающаяся антенна типа параболический цилиндр на космическом аппарате (в раскрытом состоянии при испытаниях на полигоне Медвежьи Озёра).

### **11.6. Реакция зеркала и способы её уменьшения.**

В передающих осесимметричных параболических антеннах эффективность работы может уменьшаться из-за частичного попадания сигнала, отражённого от рефлектора (основного или вспомогательного), в тракт облучателя. Для компенсации такого эффекта, называемого реакцией

зеркала, используют дополнительные отражатели, формирующие отражённую волну, сфазированную в противофазе с волной, попадающей в тракт облучателя. Различные виды конструктивного исполнения таких устройств показаны на рис. 11.12. и 11.13.

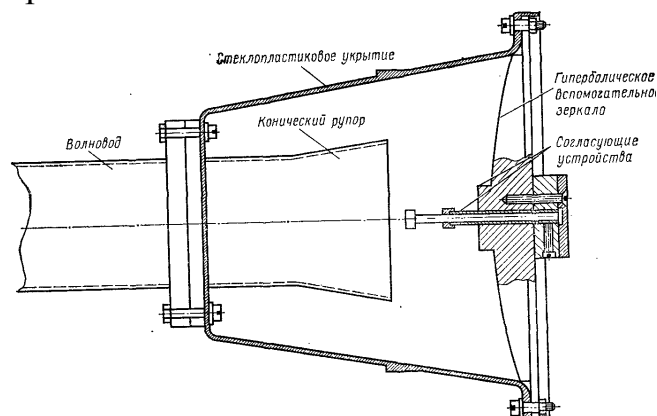


Рис.11.12. Конструктивное исполнение системы «облучатель - контррефлектор» при близком их расположении. В центре контррефлектора виден штырь, уменьшающий отражённую волну в тракте облучателя

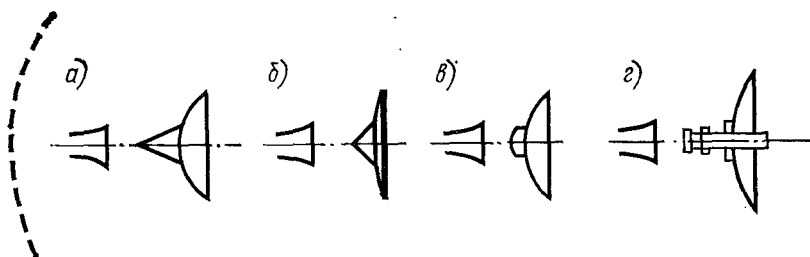


Рис.11.13. Различные варианты исполнения элементов, уменьшающих реакцию контррефлектора

### 11.7. Конструктивное исполнение больших полноповоротных зеркальных антенн.

Полноповоротные параболические антенны большого диаметра (до 100 метров, включительно) применяют в радиоастрономии и для дальней космической связи. В антеннах дальней космической связи требуется излучать сигналы большой средней мощности (десятки, а то и сотни киловатт). Соответствующие передающие устройства (с искусственным охлаждением) имеют значительные размеры и не могут быть размещены в области первичного или вторичного фокуса. Их размещают на неподвижной конструктивной части антенны. Мощный сигнал требуется передать на большое расстояние к облучателю. Иногда для этого используют проложенные по конструкциям антенны волноводы, как показано на левой части рис. 11.14. Полноповоротная антенна вращается вокруг двух осей: обычно вертикальной для поворота по азимуту, и горизонтальной при вращении по углу места. Волноводы, проложенные вдоль этих осей состоят из двух частей – неподвижной и вращающейся. В месте стыка этих частей

расположены вращающиеся сочленения. Использование длинных одноволновых волноводов и вращающих сочленений может приводить к существенным потерям мощности, которые недопустимы. В этом случае в конструкции антенн встраивают лучевые волноводы (лучеводы), вносящие существенно меньшие потери. Такой волновод, состоящий из 4-х рефлекторов показан на рис. 11.14. справа.

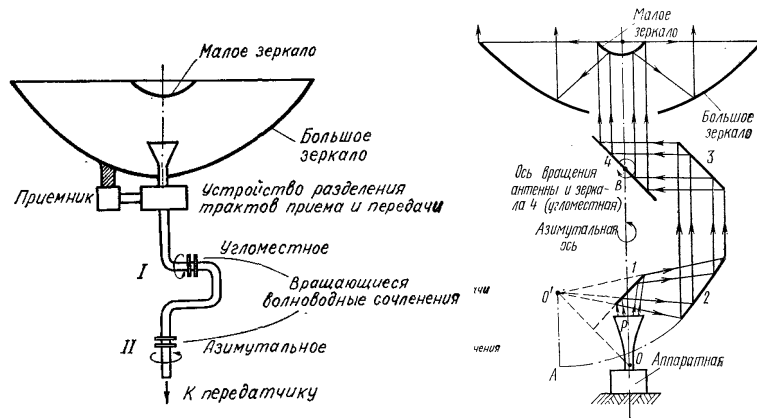


Рис.11.14. Варианты конструктивного исполнения тракта полноповоротной двухзеркальной антенны

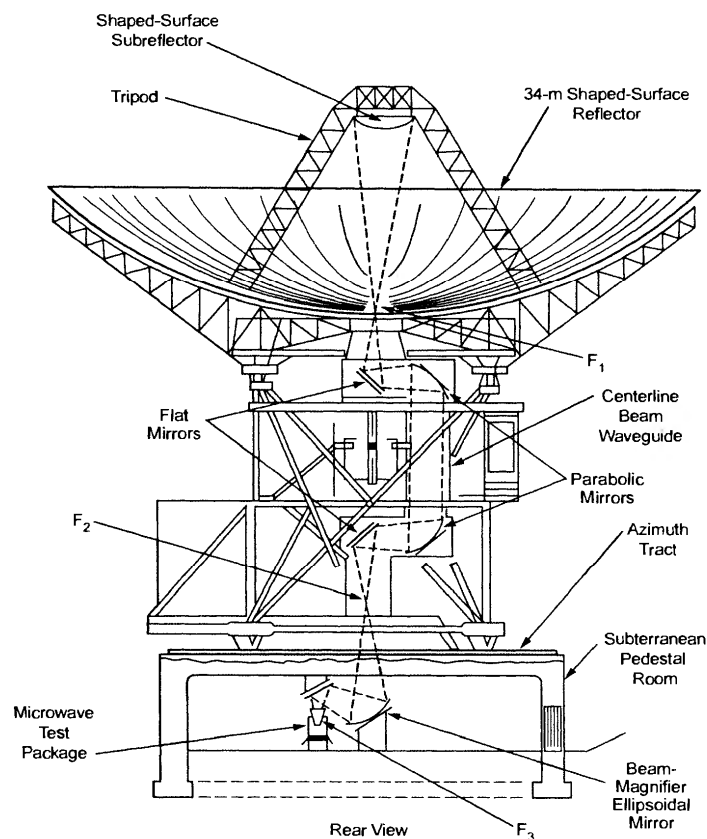


Рис.11.15. Механические конструкции антенны Кассегрена с лучеводом и угломестно-азимутальной подвеской.



На рис.11.15 показано, как такой лучевод встраивается в механическую конструкцию большой полноповоротной параболической антенны для дальней космической связи.

## 15.8. Линзовые антенны

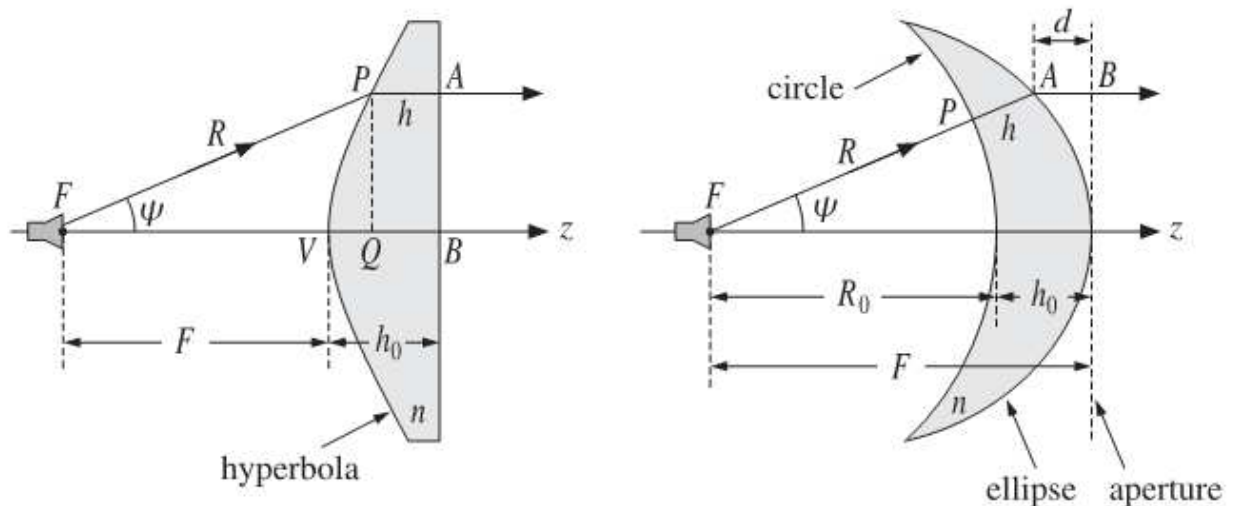


Рис. 15.21. Диэлектрические линзовые антенны

На рис.15.21 слева показана плоско-выпуклая линза, она ограничена плоскостью с правой стороны и выпуклой поверхностью (как будет показано – гиперboloидом) с левой стороны. Справа изображена вогнуто-выпуклая линза, ограниченная слева поверхностью сферы, а справа – выпуклой поверхностью эллипсоида.

Исследуем более внимательно левую линзу. Линза выполнена из диэлектрического материала с коэффициентом преломления  $n > 1$ . Из фокуса  $F$  на линзу падает сферическая волна. Наша задача состоит в нахождении формы её поверхности, такой, чтобы на выходе волна превратилась бы в плоскую, распространяющуюся параллельно оси симметрии  $z$ . Для этого необходимо и достаточно, чтобы набег фазы в каждой точке фронта плоской волны был один и тот же. В частности, длина хода луча из фокуса в точку  $P$  должна быть такой же, как из фокуса вдоль оси в проекцию точки  $P$  точку  $Q$ .

$$R = FV + nVQ = f + n(R \cos \psi - f)$$

$f$  – обозначает фокусное расстояние линзы  $FV$ . Из полученного равенства получаем уравнение поверхности линзы в полярных координатах с центром в фокусе линзы:

$$R = \frac{(n-1)f}{n \cos \psi - 1};$$

Это уравнение гиперболы с эксцентриситетом  $e = n$ . (В этом можно убедиться, сопоставив полученное уравнение с уравнением гиперболы в

полярных координатах с центром в фокусе гиперболы в справочнике по математике).

Таким же способом можно получить уравнение поверхности линзы для правого рис. 15.21.

$$R = \frac{(n-1)f}{n - \cos \psi} ;$$

Это уравнение эллипсоида. Диэлектрические линзы на практике применяют в миллиметровом диапазоне волн и для более высокочастотных волн. В сантиметровом диапазоне волн и для более длинных волн диэлектрические линзы становятся слишком массивными и не применяются. Для уменьшения толщины линзы применяют зонирование. Поверхность линзы делают ступенчатой с величиной ступенек равной или кратной длине волны. В этом случае фазовые соотношения не нарушаются.

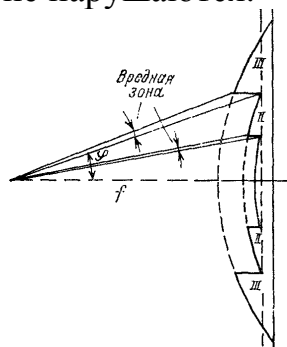


Рис. 15.22. Зонированная линза.

К сожалению, мощность сферической волны частично теряется в секторах, опирающихся на ступеньки (на рисунке эти сектора обозначены как вредные зоны). Этот эффект приводит к увеличению боковых лепестков. У зонированных линз имеется ещё один недостаток – они более узкополосны. В то время, как в полной линзе определяющие фазовые соотношения не меняются при изменении частоты, в зонированных линзах меняется набег фаз на ступеньках.

При практическом применении диэлектрических линз следует также учитывать, что со временем диэлектрические параметры меняются – диэлектрик стареет. Особенно это проявляется под действием внешних факторов, таких как радиация. От этого линзовая антенна расстраивается. Существенно меньше подвержены старению металлические устройства. В связи с этим для линейно поляризованных волн линзовые антенны на практике часто выполняют из металлических пластин (рис. 15.22.)

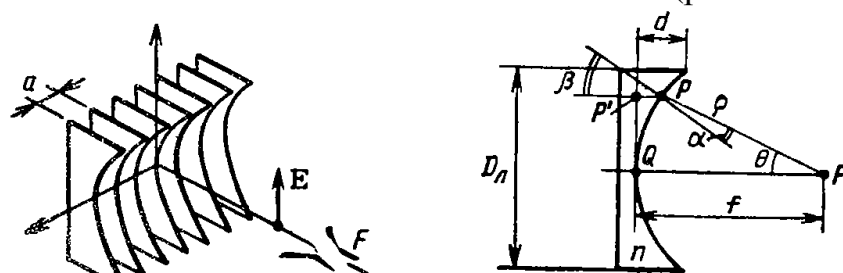


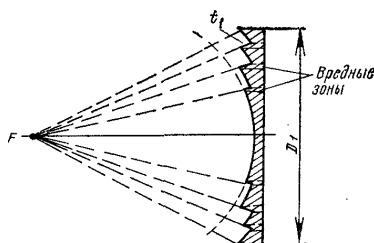
Рис. 15.22. Металлопластинчатая линза.

Фазовая скорость радиоволны с вектором электрического поля, параллельным пластинам, в промежутках между пластинами, подобно скорости волны в прямоугольном металлическом волноводе, больше скорости света в свободном пространстве.

$$v_{\phi} = c \left( 1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right)^{-0.5}$$

На использовании этого эффекта основано построение металлической ускоряющей линзы с коэффициентом преломления  $n = \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2}$ . Для

поверхности плоско вогнутой линзы справедливо то же уравнение, что и для плоско выпуклой, только профиль линзы будет в этом случае эллиптическим, поскольку эксцентриситет поверхности, равный коэффициенту преломления, будет в этом случае меньше единицы. Зонированная металлопластинчатая линза строится аналогично диэлектрической зонированной линзе (рис. 15.23)

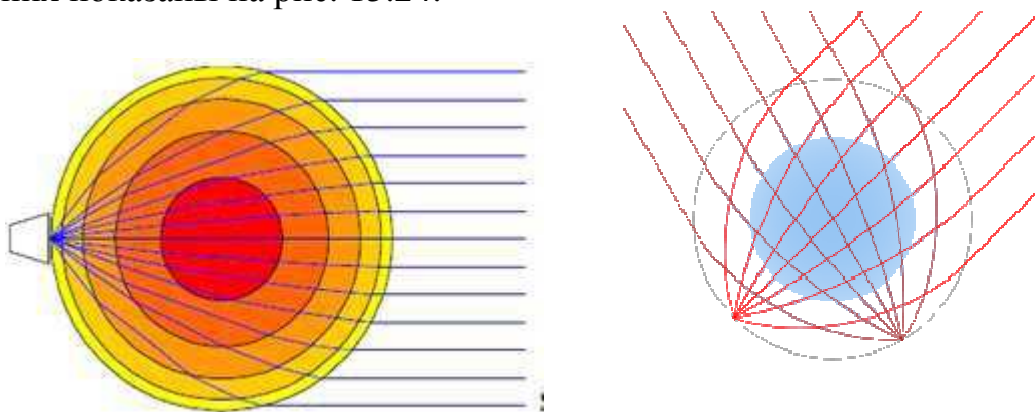


**Рис. 15.23. Зонированная металлопластинчатая линза.**

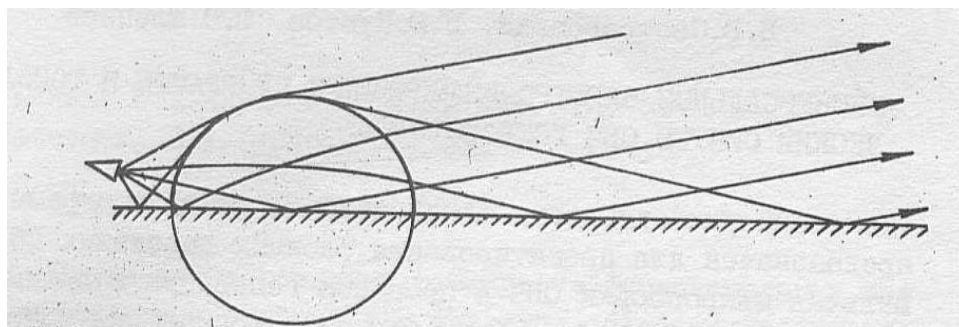
Антенна, в которой несколько независимых облучателей могут создать несколько лучей в разных направлениях, называются многолучевыми. Яркий пример многолучевой антенны – линза Люнеберга. Так называют сферически симметричную линзу, у которой коэффициент преломления внутри линзы меняется по закону:

$$n(r) = \sqrt{2 - (r/r_0)^2}$$

В этой формуле  $r_0$  - внешний радиус линзы. Линзы и возможный ход лучей в них показаны на рис. 15.24.



**Рис. 15.24. Линзы Люнеберга**



**РЛС С-диапазона "Неман" (диаметр 5 м)**