

Кафедра 406 МАИ
Радиофизика, антенны и микроволновая техника
Учебная лаборатория «Антенны и микроволновая техника»

Лабораторная работа № 7.

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ
С ИЗМЕНЯЕМОЙ ДИАГРАММОЙ
НАПРАВЛЕННОСТИ**

Работа № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

Цель работы

1. Изучить принцип работы зеркальных антенн; произвести расчет направленных свойств зеркальной антенны.
2. Произвести экспериментальное исследование игольчатой и косекансной диаграмм направленности зеркальной антенны.
3. Произвести экспериментальное исследование зависимости коэффициента стоячей волны на входе антенны в различных режимах работы антенны.
4. Определить относительную амплитуду поля паразитной поляризации.

Теоретическая подготовка к работе

Для выполнения работы необходимо изучить теоретический материал по зеркальным (параболическим) антеннам и способам формирования косекансных диаграмм направленности, изложенный в лекциях по курсу «Устройства СВЧ и антенны». Этот же материал можно найти в [1–4]. Кроме того, необходимо изучить описание измерительной линии (Приложение А), определение характеристик направленности антенн (Приложение Б), разобраться в устройстве и принципе работы ферритового поляризатора.

Помимо указанных материалов требуется знать принципиальные особенности исследуемой антенны самолетной радиолокационной станции, которая имеет два режима работы: а) обзор земной поверхности; б) обзор облачных образований грозового характера. В первом режиме используется косекансная диаграмма направленности и электромагнитная волна с горизонтальной поляризацией, а во втором режиме – диаграмма направленности карандашного типа и волна с вертикальной поляризацией.

Зеркальные антенны

Зеркальной антенной называют совокупность слабонаправленного облучателя 1 и металлического отражателя (зеркала) 2 (рис. 7.1). Форма поверхности зеркала выбирается такой, чтобы сферический фронт волны 3 , падающей от облучателя на зеркало, после отражения преобразовался в плоский фронт волны 4 . С позиций геометрической оптики лучи, расходящиеся от облучателя, после отражения от зеркала образуют параллельный пучок, формируя остронаправленную диаграмму направленности (ДН). Зеркальные антенны могут иметь разную форму зеркала: параболоид вращения, параболический цилиндр, усеченный параболоид, специальный профиль зеркала. В параболоидах вращения облучатель должен быть точечным, в цилиндрическом параболоиде – линейным.

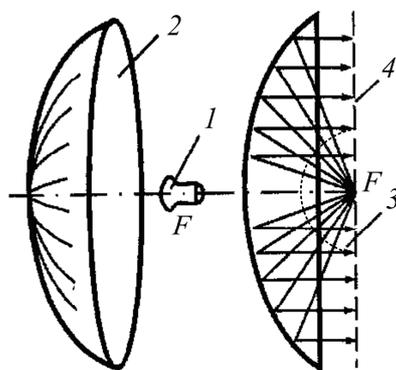


Рис. 7.1. Зеркальная антенна: 1 – облучатель; 2 – отражатель; 3 – сферический фронт волны; 4 – плоский фронт волны

Покажем, что для преобразования сферического фронта волны в плоский поверхность отражателя должна быть частью поверхности параболоида вращения (рис. 7.2). В силу осевой симметрии доказательство достаточно провести для произвольной плоскости, проходящей через ось симметрии параболоида вращения.

На рис. 7.2 изображена парабола S , являющаяся геометрическим местом точек, равноудаленных от фокуса F и прямой линии l , называемой директриссой (т.е. для произвольной точки M на параболе $FM = MN$). Точка O называется вершиной параболы, отрезок OF – фокусным расстоянием $f_{\text{фр}}$.

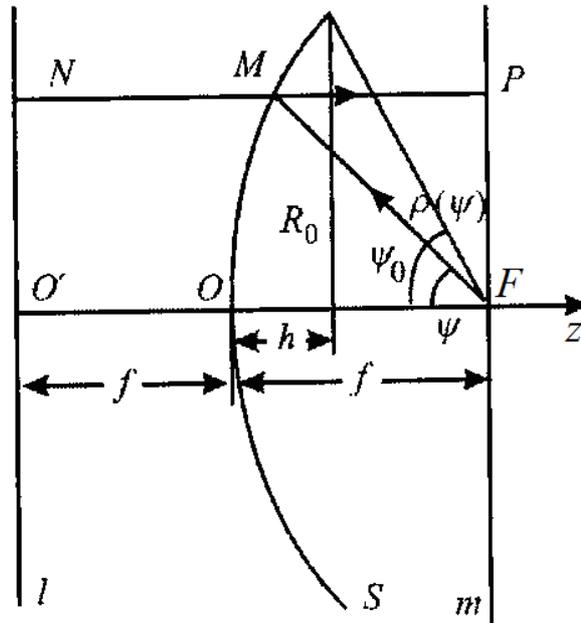


Рис. 7.2. Геометрия профиля зеркальной антенны

Проведем линию m , перпендикулярную OF . Для произвольной точки P , лежащей на прямой m , длина ломаной FMP равна

$$FM + MP = MN + MP = NP = O'F = 2f_{\text{фр}}. \quad (7.1)$$

Таким образом, расстояние $FMP = 2f_{\text{фр}}$ не зависит от положения точки M на параболе. Следовательно, сферическая волна, распространяющаяся из точки F , после отражения от параболоида вращения S преобразуется в плоскую волну, поверхность равной фазы которой совпадает с плоскостью m ,

перпендикулярной ос $\rho(\psi) = \frac{2f_{\text{фр}}}{1 + \cos\psi} = \frac{f_{\text{фр}}}{\cos^2\left(\frac{\psi}{2}\right)}$ и параболоида OF .

Обозначая FM через ρ , соотношение (7.1) можно записать в виде

$$\rho + \rho \cos\psi = 2f_{\text{фр}},$$

откуда получаем уравнение для образующей параболоида вращения в полярной системе координат:

$$(7.2)$$

На рис. 7.2, кроме фокусного расстояния $f_{\text{фр}}$, обозначены другие важные геометрические параметры зеркальной антенны с зеркалом в виде параболоида вращения: диаметр зеркала $2R_0$, угол раскрытия зеркала $2\psi_0$ и глубина зеркала h .

Из этих параметров только два (обычно $2R_0$ и $f_{\text{фр}}$) являются независимыми. Остальные параметры определяются через них следующим образом:

$$\psi_0 = 2 \arctg \left(\frac{R_0}{2f_{\text{фр}}} \right),$$

$$z_0 = f_{\text{фр}} \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\psi_0}{2} \right) = \frac{R_0^2}{4f_{\text{фр}}}.$$

В зависимости от соотношения между R_0 и $f_{\text{фр}}$ зеркальные антенны делятся на длиннофокусные ($R_0 < 2f_{\text{фр}}$ или $\psi_0 < \pi/2$) и короткофокусные ($R_0 > 2f_{\text{фр}}$ или $\psi_0 > \pi/2$).

Форму зеркала характеризуют с помощью либо отношения радиуса раскрыва к удвоенному фокусному расстоянию $R_0/(2f_{\text{фр}})$, либо величины половины угла раскрыва ψ_0 . Зеркало называют мелким (длиннофокусным), если $\psi_0 < \pi/2$; глубоким (короткофокусным), если $\psi_0 > \pi/2$.

Из приведенных соотношений следует, что профиль зеркальной антенны не зависит от частоты, поэтому параболические зеркальные антенны являются чрезвычайно широкополосными устройствами, рабочая полоса частот которых в основном определяется рабочей полосой частот облучателя.

Отметим общие требования, предъявляемые к облучателям зеркальных антенн.

1. Облучатель должен иметь фазовый центр, который располагается в фокусе параболоида вращения (для параболического цилиндра облучатель должен формировать цилиндрическую волну с линией фазовых центров, расположенных на фокальной линии параболического цилиндра).

2. Амплитудная ДН облучателя должна быть такова, чтобы почти вся мощность от облучателя попадала на зеркало. В облучателе должно отсутствовать излучение в направлении, противоположном направлению на зеркало. Кроме того, так как амплитудное распределение в раскрыве зеркала создается в основном ДН облучателя, то форма амплитудной ДН облучателя должна соответствовать требуемой форме амплитудного распределения поля в раскрыве зеркала.

3. Поскольку облучатель находится в поле, отраженном от зеркала, то его габаритные размеры должны быть как можно меньше, чтобы он создавал минимальное затенение для поля зеркальной антенны.

4. Так как электрическая прочность и частотные свойства зеркальной антенны в основном ограничиваются облучателем, то эти параметры облучателя должны соответствовать аналогичным параметрам всей зеркальной антенны.

Наиболее распространенными типами облучателей зеркальных антенн являются следующие излучатели:

вибраторные;

щелевые;

волноводно-рупорные;

антенные решетки, составленные из указанных типов излучателей.

Вибраторный облучатель состоит из активного резонансного полуволнового вибратора и контррефлектора в виде металлического диска или пассивного вибратора. Питание вибратора осуществляется от коаксиального фидера или волновода. Вибраторы, питаемые коаксиальным фидером, применяются в качестве облучателей в дециметровом и длинноволновой части сантиметрового диапазона волн. Волноводное питание вибраторов используется в более коротковолновом ($\lambda = 3 \dots 5$ см) диапазоне волн.

Вибраторные облучатели имеют довольно широкую ДН. Оптимальный угол раскрытия зеркала для таких облучателей составляет около $2\psi_0 = 140^\circ \dots 160^\circ$.

Достоинством вибраторных облучателей является незначительное затенение, создаваемое системой питания этих облучателей. К недостаткам вибраторных облучателей относят их узкополосность (5–10%), связанную с резонансными свойствами вибраторов, а также относительно высокий уровень излучения в направлениях, противоположных направлениям на зеркало.

Щелевые облучатели широко используются в сантиметровом диапазоне волн. Примером такого облучателя является двухщелевой облучатель,

представляющий собой прямоугольный волновод, который заканчивается прямоугольным резонатором с двумя симметрично расположенными полуволновыми щелями в его широкой стенке. Щели в волноводе прорезаются симметрично относительно питающего волновода. Ориентация облучателя в пространстве зависит от требуемой поляризации поля излучения.

Двухщелевой облучатель отличается компактностью, мало затеняет зеркало и обладает ДН, близкой к осесимметричной. Недостатками двухщелевого облучателя являются относительно небольшая пропускаемая мощность, связанная с малой электрической прочностью щелей, и узкополосность облучателя, обусловленная узкополосностью щелевых излучателей.

Волноводно-рупорные облучатели представляют собой либо открытый конец волновода, либо небольшой рупор, питаемый волноводом. Используются волноводы (рупоры) как прямоугольного, так и круглого сечения.

В рупорных облучателях имеются довольно значительные возможности как для регулирования как ширины ДН, так и формы этой ДН в пределах угла раскрытия зеркала. Для этой цели, кроме подбора размеров рупора, используются импедансные структуры, выполненные в виде набора кольцевых канавок на внутренних стенках рупора. Подбирая параметры этих канавок, можно получить более равномерное облучение зеркала при сохранении малого уровня мощности облучателя, проходящего мимо зеркала. Для расширения ДН рупорного облучателя используются также диэлектрические линзы, помещаемые в его раскрытие.

Рупорные облучатели конструктивно просты, обладают хорошими диапазонными свойствами, пропускают значительные мощности и поэтому наиболее широко используются в зеркальных антеннах.

Их основным недостатком является сравнительно большое затенение раскрытия зеркала как самим рупором, так и поддерживающей его системой крепления и питающим волноводом.

Далее рассмотрим характеристики направленности зеркальных антенн. Зеркальные антенны относятся к классу апертурных антенн с плоским синфазным излучающим раскрывом. Поэтому ДН зеркальной антенны можно рассчитать апертурным методом, зная распределение поля в раскрыве зеркала.

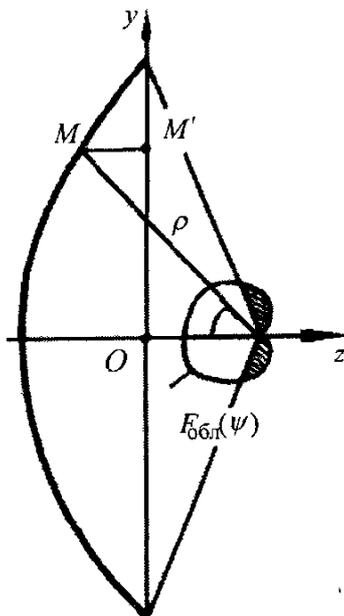


Рис. 7.3. Геометрия задачи определения амплитудного распределения в раскрыве зеркальной антенны

В приближении геометрической оптики амплитуда электрического поля в произвольной точке M , лежащей в плоскости xOy на раскрыве зеркальной антенны (рис. 7.3), пропорциональна ДН облучателя и обратно пропорциональна величине ρ^n :

$$E_S(M') = AF_{\text{обл}}(\psi) \frac{1}{\rho^n}, \quad (7.3)$$

где ρ – расстояние от фокуса до точки M ; A – некоторая константа; $n = 1$ для антенны с зеркалом в виде параболоида вращения.

При подстановке в (7.3) выражения для образующей параболоида вращения ρ из (7.2) получаем

$$E_S(M') = \frac{A}{f_{\text{фр}}^n} \left(\frac{1 + \cos \psi}{2} \right)^n F_{\text{обл}}(\psi).$$

Координата y точки M' и угол ψ связаны друг с другом соотношением

$$\sin\psi = \frac{y}{\rho} = \frac{y(1+\cos\psi)}{2f_{\text{фр}}},$$

откуда для каждого значения y находится угол ψ_y . С учетом этого угла выражение для амплитудного распределения в раскрыве зеркальной антенны записывается следующим образом:

$$E_s(y) = \frac{A}{f_{\text{фр}}^n} \left(\frac{1+\cos\psi_y}{2} \right)^n F_{\text{обл}}(\psi_y). \quad (7.4)$$

Для зеркал в виде параболоида вращения это соотношение справедливо при $n = 1$ для любой плоскости, проходящей через ось параболоида, при этом вместо координаты y надо подставить расстояние r от точки M' до оси параболоида.

Основная поляризация поля в раскрыве зеркальной антенны совпадает с поляризацией облучателя. Появляющаяся в раскрыве зеркальной антенны паразитная (кроссполяризованная) составляющая, как правило, невелика и в рамках метода геометрической оптики не учитывается.

Найденное по (7.4) амплитудное распределение аппроксимируется одной из подходящих функций для прямоугольного или круглого раскрыва, после чего может быть рассчитан множитель направленности зеркальной антенны. Диаграмма направленности элементарной площадки определяется соотношением $(1 + \cos\theta)/2$.

Коэффициент усиления зеркальной антенны определяется по формуле

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_a \nu \eta,$$

где ν – коэффициент использования поверхности (КИП) раскрыва; η – коэффициент полезного действия (КПД) антенны.

Основными источниками потерь в длиннофокусных зеркальных антеннах, наиболее часто используемых на практике, являются потери на рассеивание части мощности облучателя мимо зеркала (см. заштрихованные области на рис. 7.3). Обозначая через $P_{\Sigma\text{обл}}$ и $P_{\Sigma\text{зер}}$ соответственно полную мощность излучения облучателя и мощность излучения облучателя, попадающую на зеркало, и

учитывая, что поток мощности пропорционален квадрату амплитудной ДН, получаем

$$\eta = \frac{P_{\Sigma \text{зер}}}{P_{\Sigma \text{обл}}} = \frac{\int_0^{\psi_0} \int_0^{2\pi} F_{\text{обл}}^2(\psi, \varphi) \sin \psi d\psi d\varphi}{\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} F_{\text{обл}}^2(\psi, \varphi) \sin \psi d\psi d\varphi},$$

где $F_{\text{обл}}^2(\psi, \varphi)$ – ДН облучателя по мощности.

Если ДН облучателя симметрична относительно оси антенны и может быть аппроксимирована функцией вида

$$F_{\text{обл}}(\psi, \varphi) = \begin{cases} \cos^n \psi, & 0 \leq \psi \leq \pi/2, \\ 0, & \pi/2 \leq \psi \leq \pi, \end{cases}$$

где n – любое положительное число, то, подставляя ее в формулу для КПД, находим

$$\eta = 1 - \cos^{2n+1}(\psi_0).$$

Коэффициент использования поверхности раскрыва зеркальной антенны ν полностью определяется характером амплитудного распределения поля в раскрыве зеркала. С ростом угла раскрыва зеркала увеличивается спадание амплитудного распределения к краям зеркала, и поэтому КИП уменьшается с увеличением угла ψ_0 .

На рис. 7.4 показаны характерные качественные зависимости КПД η и КИП ν от угла ψ_0 для зеркальных антенн. Там же приведен график зависимости коэффициента $g = \eta\nu$, называемого эффективностью зеркальной антенны, от угла ψ_0 . Из графиков, представленных на рис. 7.4, следует, что существует оптимальный угол раскрыва $\psi_{0\text{опт}}$, при котором эффективность и, следовательно, коэффициент усиления зеркальной антенны максимальны.

Эффективность зеркальной антенны зависит только от ДН облучателя и угла раскрыва зеркала:

$$g = \frac{\operatorname{ctg}^2 \frac{\psi_0}{2} \left| \int_0^{\psi_0} \int_0^{2\pi} F_{\text{обл}}(\psi, \varphi) \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} d\psi d\varphi \right|^2}{\pi \int_0^{\psi_0} \int_0^{2\pi} F_{\text{обл}}^2(\psi, \varphi) \sin \psi d\psi d\varphi}.$$

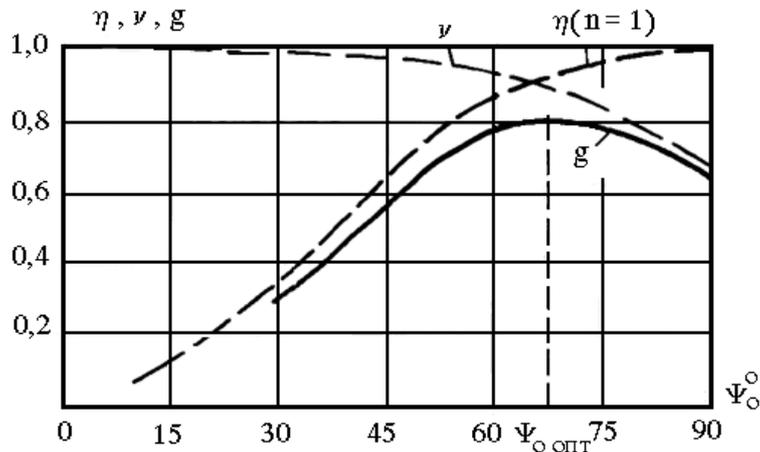


Рис. 7.4. Графики зависимости КПД, КИП и эффективности зеркальной антенны от угла раскрыва

Графики зависимости эффективности g от угла ψ_0 при различных значениях параметра аппроксимации n показаны на рис. 7.5. Для наиболее широко используемых на практике облучателей параметр n лежит в интервале $1 \dots 2$. При этом оптимальный угол раскрыва $\psi_{0\text{опт}}$ находится в интервале $55^\circ \dots 65^\circ$. Оптимальное фокусное расстояние $f_{\text{фр опт}}$ выражается через $\psi_{0\text{опт}}$ и диаметр раскрыва $2R_0$ следующим образом:

$$f_{\text{фр опт}} = \frac{R_0}{2} \operatorname{ctg} \left(\frac{\psi_{0\text{опт}}}{2} \right).$$

Уровень ослабления поля на краю зеркала при оптимальном фокусном расстоянии $f_{\text{фр}} = f_{\text{фр опт}}$ составляет $-7,5 \dots -8$ дБ по сравнению с полем в центре раскрыва зеркала. Максимальная эффективность достигает величины $g_{\text{max}} = 0,82$. На практике затенение облучателя и системы крепления, кроссполяризационные потери и ряд других эффектов приводят к уменьшению эффективности до значений $g = 0,4 \dots 0,6$.

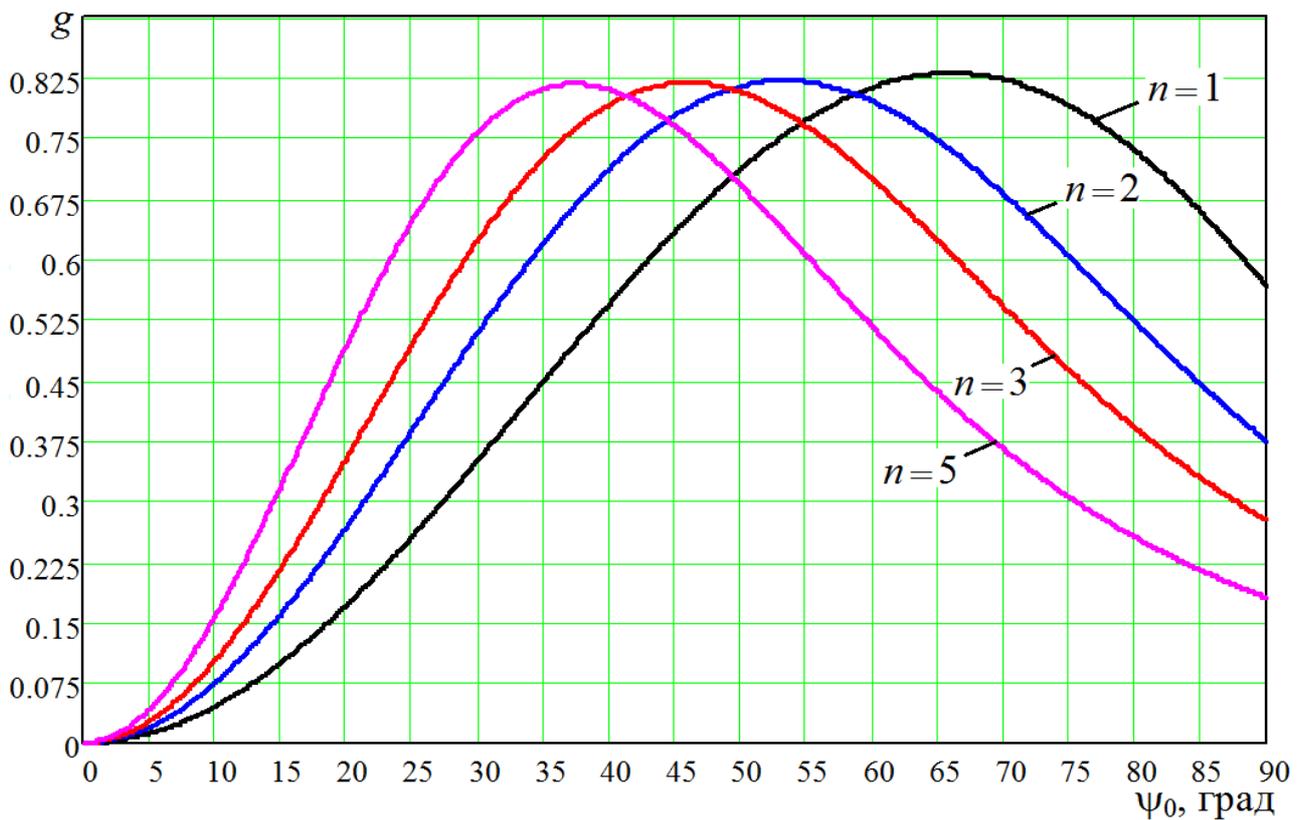


Рис. 7.5. Графики зависимости эффективности зеркальной антенны от угла раскрытия при различных значениях $n = 1, 2, 3, 5$

Рассмотрим возможность устранения реакции зеркала на облучатель. Часть отраженных от зеркала лучей, на пути которых находится облучатель, перехватывается последним. По отношению к отраженным от зеркала волнам облучатель ведет себя как приемная антенна. В основном на облучатель воздействуют волны, отраженные вблизи вершины (т.е. центра) зеркала. Чем больше коэффициент направленного действия (КНД) облучателя, тем большую мощность он перехватывает. Перехваченная мощность создает в линии питания волну, идущую от облучателя к генератору, аналогичную по действию обычной отраженной волне, возникающей в линии вследствие ее рассогласования с нагрузкой. Появление в тракте отраженной от зеркала волны ухудшает согласование антенны, так как эквивалентно изменению входного сопротивления антенны.

Прямой метод подстройки облучателя согласующим элементом, расположенным непосредственно в облучателе или в его фидерном тракте,

является узкополосным. Для ослабления реакции зеркала на облучатель используются следующие способы:

- 1) вынос облучателя из поля, отраженного от зеркала;
- 2) установка у зеркала вспомогательного отражателя;
- 3) поворот плоскости поляризации поля, отраженного от зеркала.

Последние два способа ослабления реакции зеркала на облучатель приводят к возрастанию уровня бокового излучения в зеркальных антеннах за счет рассеяния в боковых направлениях той части энергии поля, отраженного от зеркала, которая раньше (без устранения реакции зеркала) поступала в облучатель.

Рассмотрим каждый из этих способов.

1. *Вынос облучателя из поля зеркала.*

На рис. 7.6 показана зеркальная антенна в виде обрезанной части параболоида вращения с облучателем, установленным в фокусе. Облучатель повернут таким образом, что его поле излучения попадает в основном на оставшуюся часть зеркала. В такой конструкции поле, отраженное от зеркала, в приближении геометрической оптики, не попадет в облучатель. В действительности незначительная часть отраженного поля все же попадает в облучатель из-за рассеяния на кромках зеркала. Недостатком данного способа является увеличение габаритных размеров антенны.

2. *Установка компенсирующей отражающей пластины*

На рис. 7.7 показана зеркальная антенна с установленной около вершины зеркала отражающей пластиной.

Задача, выполняемая пластиной, заключается в том, чтобы в месте расположения облучателя скомпенсировать поле, отраженное от зеркала, полем, отраженным от пластины. Диаметр пластины d и расстояние a от вершины параболоида до пластины можно найти по формулам

$$d = 1,1 \sqrt{f_{\text{фр}} \lambda},$$

$$a = (2n+1) \frac{\lambda}{4} - \frac{5}{24} \lambda, \quad \text{где } n = 0, 1, 2.$$



Рис. 7.6. Вынос облучателя из поля зеркальной антенны

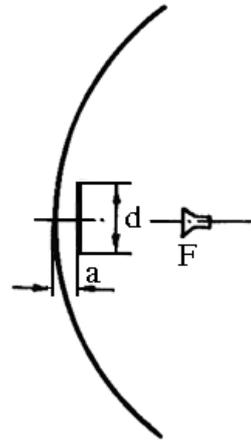


Рис. 7.7. Установка компенсирующей отражающей пластины в зеркальной антенне

3. Поворот плоскости поляризации

Устранение реакции зеркала на облучатель за счет поворота плоскости поляризации при отражении от зеркала основано на том, что облучатель с линейной поляризацией не будет принимать поле с такой поляризацией, если поворот плоскости поляризации произошел на 90° . Указанный поворот можно осуществить, если перед гладким зеркалом вплотную к нему расположить систему тонких параллельных металлических пластин высотой $\lambda/4$ с расстоянием между ними $S \ll \lambda$. Угол между вектором падающего от облучателя поля $E_{\text{пад}}$ и плоскостью пластин должен равняться 45° (рис. 7.8).

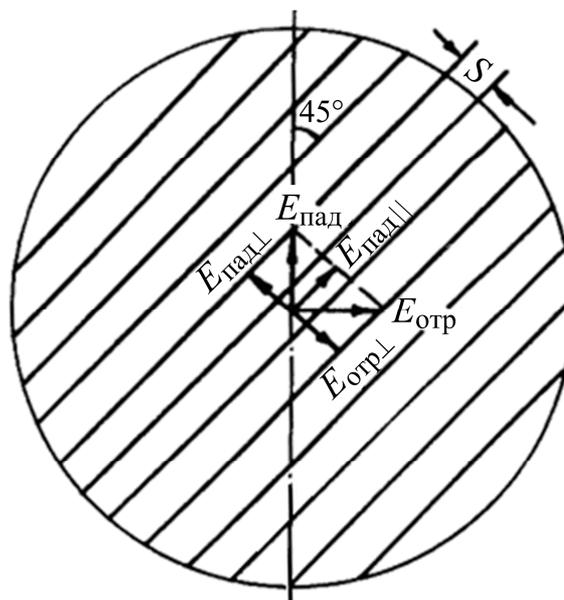


Рис. 7.8. Поворот плоскости поляризации в зеркальной антенне

Разложим вектор $E_{\text{пад}}$ на две составляющие: параллельную $E_{\text{пад}\parallel}$ и нормальную $E_{\text{пад}\perp}$ относительно поверхности пластин. Составляющая $E_{\text{пад}\parallel}$ отразится от поверхности, образуемой ребрами пластин, так как последние являются для поля $E_{\text{пад}\parallel}$ аналогом системы закритических волноводов. Составляющая $E_{\text{пад}\perp}$ проходит между пластинами и отражается от поверхности зеркала. За счет дополнительной разности хода в $\lambda/2$ отраженное от зеркала поле $E_{\text{отр}\perp}$ приобретает дополнительный набег фазы в 180° по сравнению с фазой отраженного от поверхности пластин поля $E_{\text{отр}\parallel}$. В результате вектор суммарного отраженного поля $E_{\text{отр}}$ повернется на 90° относительно вектора падающего поля. Далее рассмотрим требования, предъявляемые к точности изготовления зеркальных антенн.

Неточности, возникающие при создании конструкции антенны, вызывают отклонение распределения поля на излучающей поверхности от расчетного и соответствующие искажения ДН. Ошибки в распределении поля по раскрыву могут быть систематическими и случайными. К систематическим ошибкам относятся такие, которые можно предусмотреть при полном и точном расчете антенны. Причинами этих ошибок могут быть смещение облучателя из фокуса, затенение раскрыва зеркала облучателем и элементами его крепления и др. Случайные ошибки обусловлены обычно небольшими случайными отклонениями параметров антенны от их расчетных значений. Причинами таких ошибок являются недостаточная точность обработки поверхности зеркала, случайные деформации поверхности антенны вследствие изменения температуры или ветровых нагрузок и др.

Технические допуски на точность изготовления зеркальных антенн определяются допустимой величиной отклонения фазового фронта в раскрыве зеркала от синфазного. Рассмотрим основные источники фазовых ошибок в раскрыве зеркальной антенны (рис. 7.9):

- 1) отклонение формы зеркала от расчетной;
- 2) смещение фазового центра облучателя из фокуса параболоида;
- 3) отклонение волнового фронта поля облучателя от сферического.

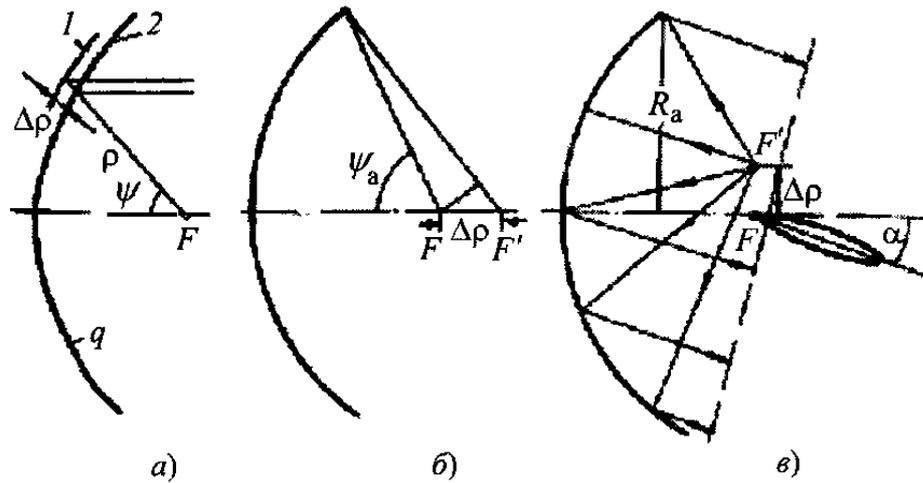


Рис. 7.9. Основные источники фазовых ошибок в раскрыве зеркальных антенн: *а* – отклонение формы зеркала от расчетной; *б* – смещение фазового центра облучателя из фокуса параболоида вдоль его оси; *в* – смещение фазового центра облучателя из фокуса параболоида поперек его оси

1. Отклонение формы зеркала от расчетной

В результате отклонения формы поверхности от расчетной изменяется расстояние, преодолеваемое волной от разных точек зеркала до облучателя, что приводит к фазовым ошибкам и ухудшению практически всех электрических характеристик антенны:

- расширяется главный лепесток ДН, и падает усиление антенны;
- увеличивается уровень бокового излучения;
- растет кроссполяризация составляющая.

На рис. 7.9, *а* показано отклонение реального профиля зеркала *1* от расчетного *2* на величину $\Delta\rho$. Фазовая ошибка $\Delta\psi$, возникающая в раскрыве зеркала, равна

$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta\rho + \Delta\rho \cos\psi). \quad (7.5)$$

Потребовав, чтобы $\Delta\psi$ не превышала $\pi/4$ (при этом искажения ДН будут незначительны), из (7.5) получим следующий допуск на точность изготовления зеркала:

$$\Delta\rho \leq \frac{\lambda}{8(1 + \cos\psi)}.$$

Максимальная точность выполнения профиля зеркала должна быть у вершины:

$$\Delta\rho \leq \lambda/16.$$

2. Смещение фазового центра облучателя из фокуса параболоида вдоль оси параболоида (рис. 7.9, б).

При смещении облучателя из фокуса вдоль оси антенны в точку F' нарушаются условия преобразования сферического фронта волны в плоский. В этом случае ошибка, возникающая в раскрыве, представляется выражением

$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\rho (1 - \cos\psi_0).$$

Потребовав, чтобы $\Delta\psi \leq \pi/4$ (при этом искажения ДН будут незначительны), получим, что допустимое смещение облучателя из фокуса равно

$$\Delta\rho \leq \frac{\lambda}{8(1 - \cos\psi_0)} \approx 0,185\lambda \Big|_{\psi_0=71^\circ}.$$

Смещение облучателя вдоль оси параболоида приводит к фазовой ошибке в раскрыве зеркала, которая имеет квадратичный характер. Поэтому направление основного лепестка ДН остается неизменным, увеличивается лишь его ширина и возрастает уровень бокового излучения.

3. Смещение фазового центра облучателя из фокуса параболоида поперек оси параболоида (рис. 7.9, в).

При небольшом смещении облучателя в направлении, перпендикулярном оси параболоида, в раскрыве антенны появляется линейная фазовая ошибка, что приводит к отклонению ДН зеркальной антенны от оси Oz на угол α в сторону, противоположную смещению облучателя:

$$\alpha \approx \arcsin\left(\frac{\Delta\rho}{R_0}\right).$$

Форма ДН при этом не меняется, если $\alpha \leq 2\theta_{0,7}$, где $2\theta_{0,7}$ – ширина ДН антенны при несмещенном облучателе.

Явление отклонения максимума ДН при смещении облучателя широко используются в радиолокации для создания равносигнального направления.

Исследуем влияние погрешности изготовления антенны на ее коэффициент усиления. С увеличением раскрыва зеркала пропорционально площади раскрыва растет коэффициент усиления G . Однако при практической реализации зеркало всегда выполняется с некоторыми погрешностями. Отклонение $\Delta\rho$ профиля реального зеркала от идеального при правильно организованном технологическом процессе, как правило, имеет случайный характер. Максимальная величина случайной ошибки определяется уровнем технологии и для зеркальных антенн с вероятностью 99% может быть определена следующим образом:

$$\Delta\rho_{\max} \approx 10^{-n} 2R_0,$$

где $n = 3$ для обычного серийного производства; $n = 4 \dots 5$ – при специальной более совершенной технологии.

Можно считать, что отклонение профиля $\Delta\rho$ подчиняется нормальному закону распределения с нулевым средним значением и дисперсией $\overline{\Delta\rho^2}$. При этом расчеты показывают, что с вероятностью 99% отклонение $\Delta\rho$ не превышает величины

$$\Delta\rho_{\max} = 2,6\sqrt{\overline{\Delta\rho^2}}.$$

С учетом рассмотренных выше ошибок дисперсия фазовой ошибки в раскрыве зеркала, обязанная случайному характеру $\Delta\rho$, равна

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \left[\frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos\psi) \right]^2 \overline{\Delta\rho^2} \approx \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 \overline{\Delta\rho^2} \approx \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{\Delta\rho_{\max}}{2,6} \right)^2 = \\ &= \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{10^{-n} 2R_0}{2,6} \right)^2 = 23,5 \cdot 10^{-2n} \left(\frac{2R_0}{\lambda} \right)^2. \end{aligned} \quad (7.6)$$

При этом коэффициент усиления антенны уменьшится на

$$\Delta G = 10 \lg(e^{-\sigma^2}), \text{ дБ.}$$

Анализ (7.6) показывает, что с увеличением радиуса зеркала возрастают случайные фазовые ошибки, что в конечном итоге приводит к замедлению роста КУ при увеличении R_0 . При увеличении R_0 сверх некоторого значения $R_{0\max}$ КУ антенны практически не увеличивается. Величина $R_{0\max}$ зависит от уровня технологии и равна

$$R_{0\max} \approx 0,2 \cdot 10^n \lambda,$$

где $n=3$ для обычного серийного производства; $n=4...5$ – при специальной более совершенной технологии.

Формирование косекансной ДН зеркальной антенны

Зеркальная антенна с косекансной ДН используется для равномерного облучения целей, находящихся на различных наклонных дальностях r , но на одинаковой высоте от земли h . Такая ДН может быть приближенно создана лишь в ограниченном секторе углов $(3^\circ...10^\circ) \leq \theta \leq (70^\circ...80^\circ)$, как показано на рис. 7.10.

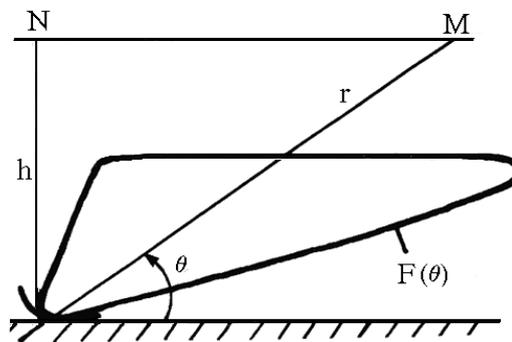


Рис. 7.10. Зеркальная антенна с косекансной ДН

Напряженность поля, создаваемого антенной с диаграммой $F(\theta)$ у цели, определяется в соответствии с выражением

$$E = \frac{A}{r} F(\theta) = \frac{A \sin(\theta)}{h} F(\theta),$$

где A – постоянный коэффициент; r – наклонная дальность; h – высота цели.

Для того, чтобы эта напряженность не менялась с изменением угла θ (при $h = \text{const}$), необходимо, чтобы ДН антенны имела следующий вид:

$$F(\theta) = \frac{A_1}{\sin(\theta)} = A_1 \operatorname{cosec}(\theta),$$

где A_1 – нормирующий множитель.

В горизонтальной плоскости косекансная ДН имеет малую ширину (обычно 1° и менее), что обеспечивает РЛС высокую разрешающую способность по азимуту.

Отметим наиболее широко используемые способы формирования косекансной ДН в вертикальной плоскости (рис. 7.11):

- 1) установка специального козырькового отражателя в параболоидах вращения;
- 2) за счет выбора профиля зеркала в цилиндрических зеркальных антеннах.

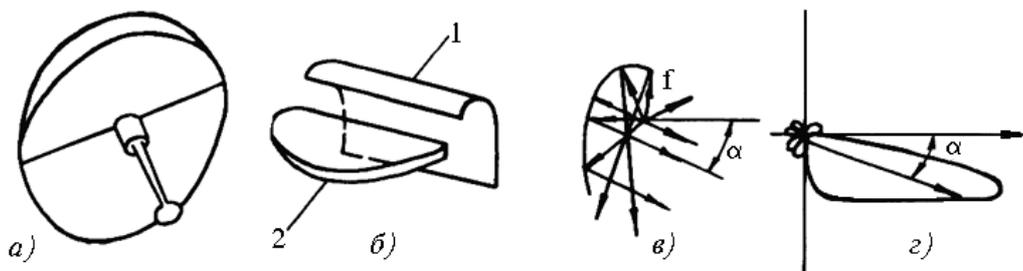


Рис. 7.11. Способы формирования косекансной ДН

Принцип формирования косекансной ДН заключается в выборе такой формы отражателя, чтобы лучи, близкие к горизонтальной оси антенны, выходили из отражателя параллельным пучком, а удаленные от нее – расходящимся пучком (рис. 7.11, в). При этом формируется косекансная ДН, показанная на рис. 7.11, г. Метод деформации профиля зеркала позволяет получить гладкую косекансную ДН в секторе $60...70^\circ$ без расширения диаграммы в горизонтальной плоскости. Однако такая конструкция существенно сложнее в реализации, особенно для больших зеркал.

Поляризаторы

Поляризатор – это устройство, предназначенное для изменения поляризации проходящей волны в тракте. На эквивалентной схеме поляризатор представляется в виде восьмиполюсника с двумя парами входных и выходных

клемм. Каждая пара клемм на входе или выходе соответствует волнам с ортогональными поляризациями в волноводе. Обычно поляризаторы делают на основе круглых или квадратных волноводов.

На рис. 7.12 показан поляризатор на круглом волноводе с волной H_{11} , внутри которого под углом ψ к оси Oy расположена диэлектрическая пластина.

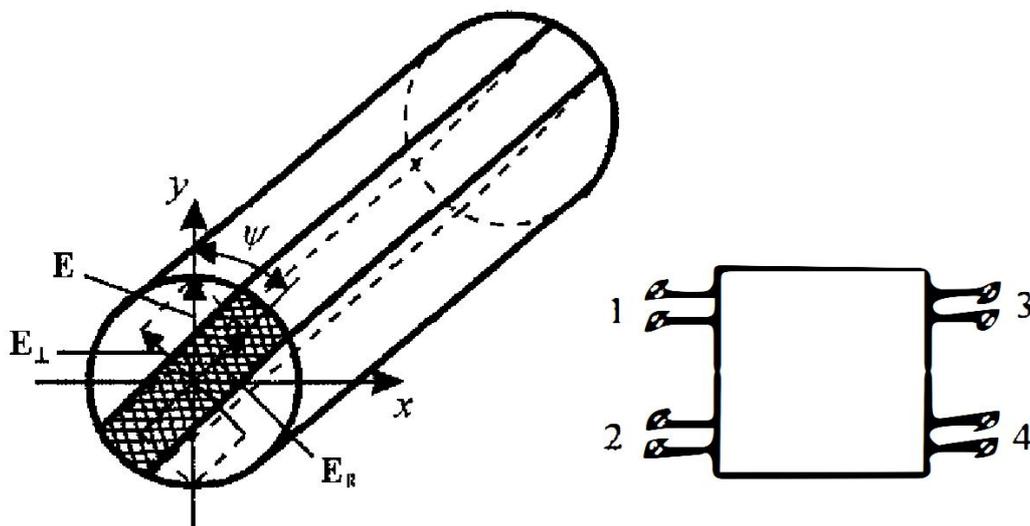


Рис. 7.12. Поляризатор на круглом волноводе и его эквивалентная схема

Волну H_{11} с произвольной ориентацией вектора \mathbf{E} в плоскости xOy можно представить в виде линейной комбинации двух волн:

1) клеммы 1 и 3 восьмиполюсника соответствуют волне H_{11} круглого волновода, вектор \mathbf{E} которой перпендикулярен пластине (волна перпендикулярной поляризации \mathbf{E}_\perp);

2) клеммы 2 и 4 восьмиполюсника соответствуют волне H_{11} круглого волновода, вектор \mathbf{E} которой параллелен пластине (волна параллельной поляризации \mathbf{E}_\parallel).

Наличие диэлектрической пластины в волноводе обуславливает различные фазовые скорости волн параллельной и перпендикулярной поляризаций. Поэтому фазовые сдвиги, вносимые этой пластиной для волн различных поляризаций, оказываются разными. Величина разности фаз $\varphi = \varphi_\parallel - \varphi_\perp$ определяется длиной диэлектрической пластины и размерами ее поперечного сечения.

При идеально согласованных и развязанных входных и выходных парах клемм поляризатора его матрица рассеяния относительно волн параллельной и перпендикулярной поляризации имеет вид

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-i\varphi} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-i\varphi} & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (7.7)$$

Заметим, что $S_{41} = S_{32} = S_{23} = S_{14} = 0$, так как волны ортогональной поляризации распространяются по волноводу независимо друг от друга, т.е. в процессе распространения этих волн не происходит обмена энергией между ними.

Рассмотрим в качестве примера прохождение через поляризатор с матрицей рассеяния (7.7) волны H_{11} единичной амплитуды, вектор \mathbf{E} которой направлен вдоль оси Oy (см. рис. 7.12). В этом случае вектор-столбец амплитуд падающих волн записывается в виде

$$a = [\sin\psi \quad \cos\psi \quad 0 \quad 0]^T.$$

Используя соотношение $b = [S]a$, находим выражение для столбца отраженных волн

$$b = [0 \quad 0 \quad \sin\psi \quad \cos\psi e^{-i\varphi}]^T.$$

Отсюда следует, что на выходе поляризатора изменилась фаза волны параллельной поляризации. Если разместить пластину под углом $\psi = 45^\circ$ и обеспечить разность фаз $\varphi = 90^\circ$, то на выходе поляризатора получим волну с левой круговой поляризацией, образованную двумя ортогональными равными по амплитуде составляющими, сдвинутыми по фазе друг относительно друга на -90° : 1) $\sqrt{2}/2$ на выходной паре клемм 3; 2) $-i\sqrt{2}/2$ на выходной паре клемм 4.

Такого же эффекта можно добиться, если вместо диэлектрической пластины на стенках круглого волновода разместить два металлических ребра в той же плоскости, что и пластина.

Поляризаторы могут быть выполнены также на основе использования эффекта Фарадея с помощью продольно подмагниченного феррита (рис. 7.13).

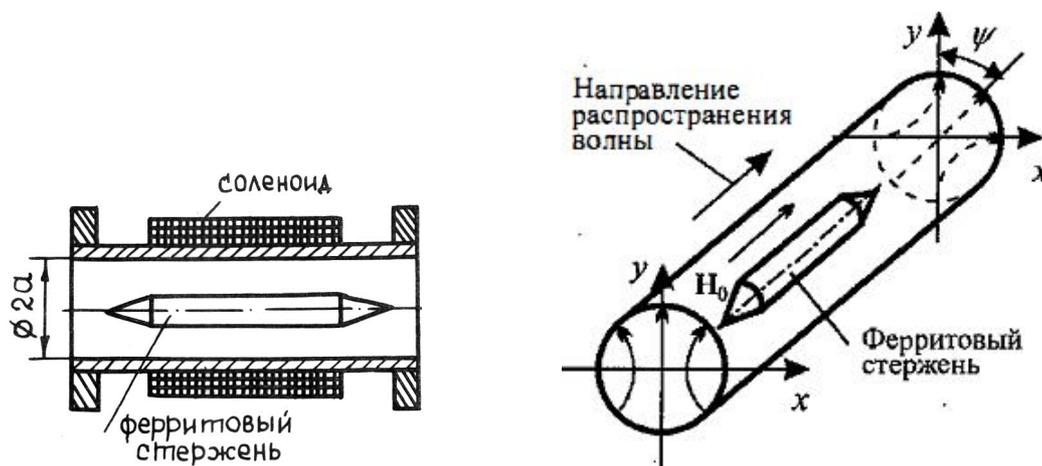


Рис. 7.13. Ферритовый поляризатор на эффекте Фарадея

Такой поляризатор состоит из круглого волновода с волной H_{11} , вдоль оси которого расположен ферритовый стержень, и намотанного на волновод соленоида, создающего постоянное поле подмагничивания H_0 . Величина этого поля выбирается такой, чтобы магнитные проницаемости феррита были бы различными для волн круговой поляризации правого и левого вращений, на которые может быть разложена линейно поляризованная волна H_{11} , подаваемая на вход поляризатора.

Из-за различия магнитных проницаемостей феррита для волн круговой поляризации противоположного вращения они имеют разные фазовые скорости в волноводе с ферритом. Поэтому при распространении волн по волноводу между ними образуется сдвиг по фазе, величина которого определяется длиной стержня. Этот фазовый сдвиг определяет поворот на угол ψ плоскости поляризации волны H_{11} , образованной сложением двух волн круговой поляризации на выходе поляризатора.

Конструкция исследуемой зеркальной антенны

Схематически конструкция зеркала антенны вместе с облучателем и поляризатором изображена на рис. 7.14. Волноводный тракт облучателя начинается с входного прямоугольного фланца I . С тыльной стороны зеркала с входным фланцем стыкуется фланец прямоугольного волновода сечением $12,6 \times 28,5$ мм, а со стороны облучателя к фланцу примыкает круглый волновод

диаметром 22 мм, являющийся частью поляризатора. Согласующим звеном между прямоугольным и круглым волноводом является овальное отверстие в центре входного фланца *1*.

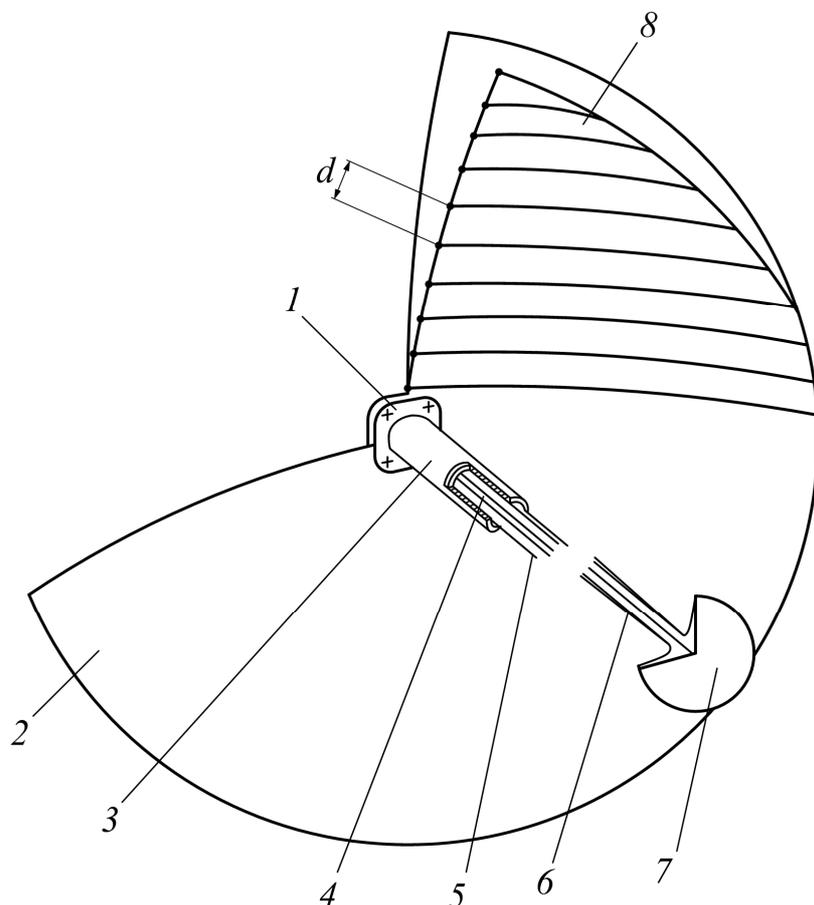


Рис. 7.14. Конструктивная схема антенны: *1* – входной фланец; *2* – металлическое зеркало; *3* – обмотка поляризатора; *4* – ферритовый стержень вместе с диэлектрическими опорными согласующими шайбами; *5* – круглый волновод; *6* – вставка фторопластовая; *7* – контррефлектор; *8* – пластмассовый козырек, армированный медными проволоками, расположенными на расстоянии *d* друг от друга

Специфической частью поляризатора является ферритовый стержень длиной 60 мм и диаметром 6 мм, расположенный в круглом волноводе около вершины зеркала. Стержень своими концами укреплен в ступенчатых диэлектрических (фторопластовых) шайбах, конфигурация и размеры которых выбраны такими, чтобы обеспечить минимальное отражение энергии от торцов стержня.

Для создания в феррите продольного подмагничивающего поля на круглом волноводе размещена обмотка 3 из медной проволоки. После поляризатора диаметр круглого волновода плавно уменьшается до 16 мм. Для того, чтобы круглый волновод с малым диаметром работал в полосе прозрачности, в него вставлена диэлектрическая (фторопластовая) втулка 6, которая затем выходит из волновода со стороны его малого диаметра и плавно переходит в диск диаметром 62 мм. С наружной стороны на диске укреплен круглая металлическая пластина специального профиля – контррефлектор 7. Контррефлектор переотражает поступающую из круглого волновода электромагнитную энергию в сторону металлического зеркала 2, имеющего козырек 8. Конструкция контррефлектора выбрана такой, что края зеркала облучаются примерно в три раза слабее («по полю»), чем его центр.

Профиль металлического (алюминиевого) зеркала 2 является параболическим, в фокусе параболоида вращения расположен облучатель с контррефлектором 7 (электрический центр этого облучателя). На верхней половине зеркала с помощью диэлектрических шпилек и гаек укреплен пластмассовый армированный козырек 8, который прозрачен для радиоволн с вертикальной поляризацией и отражает волны с горизонтальной поляризацией.

При токе подмагничивания поляризатора порядка 20 мА облучатель излучает (принимает) горизонтально поляризованную электромагнитную волну. При этом козырек отражает облучающие его волны и совместно с нижней половиной параболического зеркала формирует косекансную диаграмму направленности. При токе противоположного направления силой 84 мА, когда поляризатор поворачивает плоскость поляризации на 90° , облучатель излучает вертикально поляризованную волну, проходящую через козырек, и антенна имеет диаграмму направленности игольчатого типа, сформированную только параболическим зеркалом.

Такие свойства козырька обуславливаются его конструкцией. Полотно козырька состоит из горизонтально расположенных медных проволок, переплетенных в поперечном направлении тонкими диэлектрическими

лентами. При падении на такое полотно вертикально поляризованной волны вектор электрического поля E -волны расположен перпендикулярно проволокам, в них не наводятся электрические токи, и волна беспрепятственно проходит сквозь полотно. При падении на полотно горизонтально поляризованной волны в проволоках возбуждается ток, и волна будет отражаться обратно. В козырьке расстояние между проволоками $d=5$ мм (см. рис. 7.14), т.е. значительно меньше длины волны, поэтому от козырька отражается практически вся падающая энергия горизонтально поляризованных волн.

Следует отметить, что говорить о строго горизонтальной или вертикальной поляризации излучаемого и отражаемого поля можно только для направлений, лежащих в горизонтальной или вертикальной плоскостях, проходящих через оптическую ось системы. Во всех остальных направлениях будет наблюдаться ортогональная составляющая поля, которая называется полем паразитной или перекрестной поляризации.

В рассматриваемой антенне рабочая длина волны $\lambda = 3,18$ см ($f = 9470$ МГц), диаметр параболического зеркала $2R = 76$ см, амплитудное распределение в раскрыве зеркала спадает к его краям примерно в три раза («по полю»).

Расчетное задание и расчетные формулы

При подготовке к лабораторной работе необходимо рассчитать диаграмму направленности параболического зеркала и его коэффициент направленного действия.

Диаграмма направленности «по полю» рассчитывается по приближенной формуле для синфазного круглого раскрыва:

$$f(u) = \Lambda_{p+1}(u), \quad (7.8)$$

где $\Lambda_{p+1}(u)$ – цилиндрическая функция (лямбда-функция) $(p+1)$ -го порядка (см.

Приложение В); $u = \frac{2\pi R}{\lambda} \sin \theta$ – обобщенный аргумент; θ – угол, отсчитываемый

от оси параболоида вращения.

Значения индекса p связаны с функцией $f(r)$, аппроксимирующей реальное амплитудное распределение $E_{\text{отн}}$ в раскрыве зеркала:

$$f(r) = \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^p, \quad (7.9)$$

где r – координата в плоскости раскрыва, отсчитываемая от центра зеркала.

Индекс p определяется на основе сопоставления по наилучшему совпадению графика реального амплитудного распределения поля $E_{\text{отн}}$ в раскрыве зеркала и графиков аппроксимирующей функции $f(r)$, вычисленных для $p = 0 \dots 2$. Для этого на отдельном рисунке строится график реального амплитудного распределения по данным табл. 7.1 и график аппроксимирующей функции $f(r)$ (не менее 10 точек).

Таблица 7.1. Значения реального амплитудного распределения по раскрыву зеркала

r , см	0	3,8	7,6	11,4	15,2	19,0	22,8	26,6	30,4	34,2	38,0
$E_{\text{отн}}$	1	1	0,99	0,96	0,89	0,81	0,71	0,6	0,49	0,37	0,27

Расчет диаграммы направленности по формуле (7.8) необходимо провести в пределах $\theta = 0 \dots 5^\circ$ через $0,25^\circ$ и построить на отдельном рисунке на миллиметровой бумаге в прямоугольной системе координат в пределах $\theta = -5 \dots +5^\circ$. Значения лямбда-функции даны в Приложении В к данной работе. По построенному графику определить ширину диаграммы направленности на уровне 0,707 и сравнить ее с рассчитанной по приближенной формуле

$$2\theta_{0,7} = K \frac{\lambda}{2R}, \text{ град}, \quad (7.10)$$

где $K = 58,5^\circ; 72,8^\circ; 84,2^\circ$ соответственно при $p = 0; 1; 2$.

Коэффициент направленного действия рассчитывается по формуле

$$D = \frac{4\pi}{\lambda^2} S v = D_0 v, \quad (7.11)$$

где $S = \pi R^2$ – геометрическая площадь раскрыва; $D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} S$ – коэффициент направленного действия параболического зеркала с равномерным амплитудным распределением; ν – коэффициент использования поверхности зеркальной антенны, учитывающий неравномерность амплитудного распределения поля в раскрыве зеркала (в данной антенне $\nu = 0,8$, в случае равномерного амплитудного распределения $\nu = 1$).

Экспериментальная часть

Описание лабораторной установки

Схематически общий вид лабораторной установки изображен на рис. 7.15 и 7.16, а на рис. 7.17 показана электрическая схема установки и исследуемой антенны.

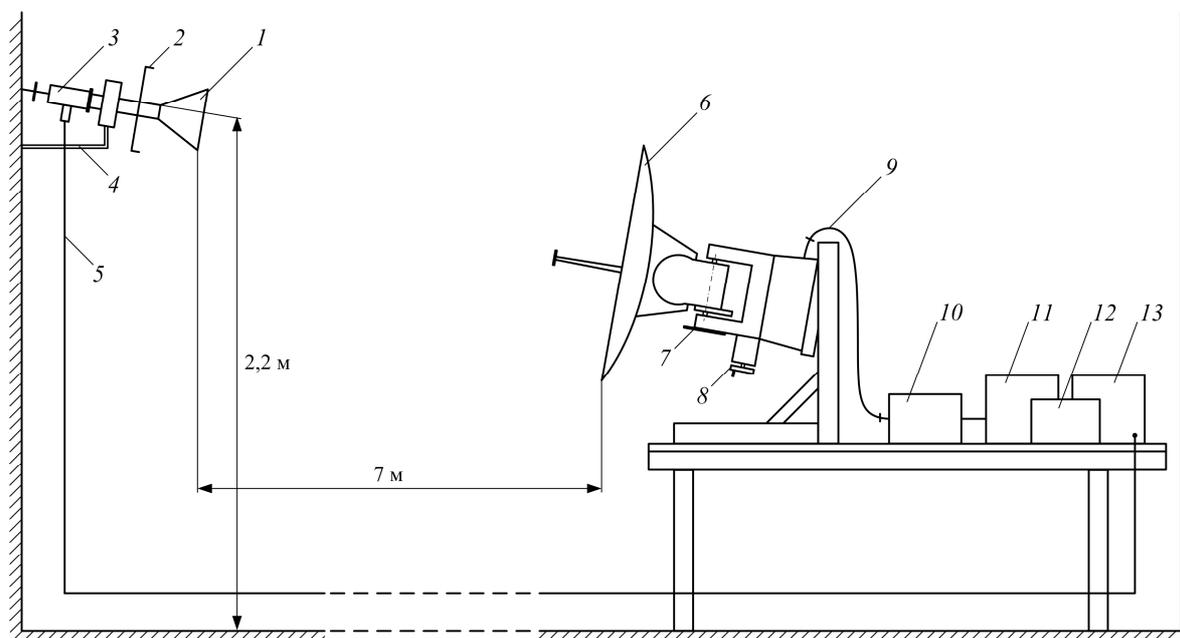


Рис. 7.15. Лабораторная установка для исследования зеркальной антенны с изменяемой диаграммой направленности: 1 – приемная рупорная антенна; 2 – рычаг поворота рупорной антенны; 3 – детекторная секция; 4 – кронштейн с вращающейся втулкой; 5 – экранированный кабель; 6 – исследуемая зеркальная антенна; 7 – шкала отсчета азимута; 8 – ручка азимутального поворота зеркала антенны; 9 – гибкий волновод; 10 – прибор для измерения $K_{св}$ (измерительная линия); 11 – генератор; 12 – регулируемый выпрямитель для питания поляризатора; 13 – измерительный прибор (милливольтметр ВЗ-38)

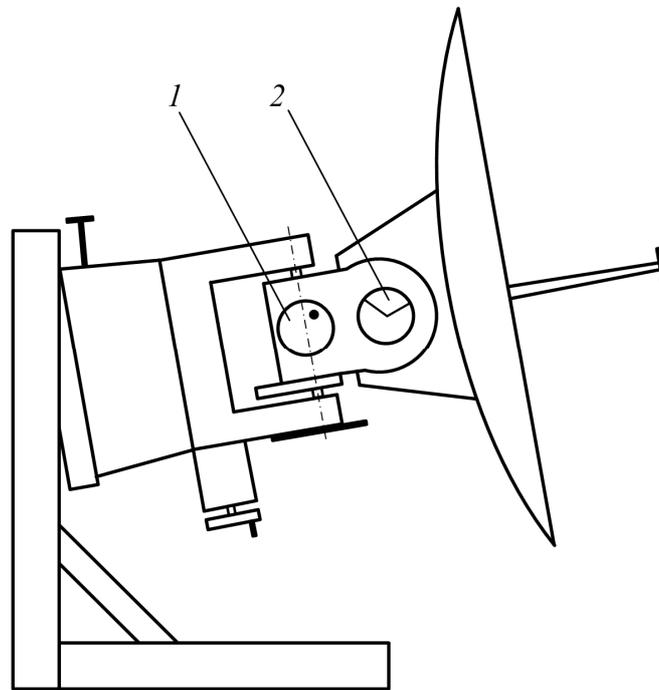


Рис. 7.16. Исследуемая антенна со стороны привода по углу места: 1 – ручка поворота зеркала антенны по углу места; 2 – указатель угла места

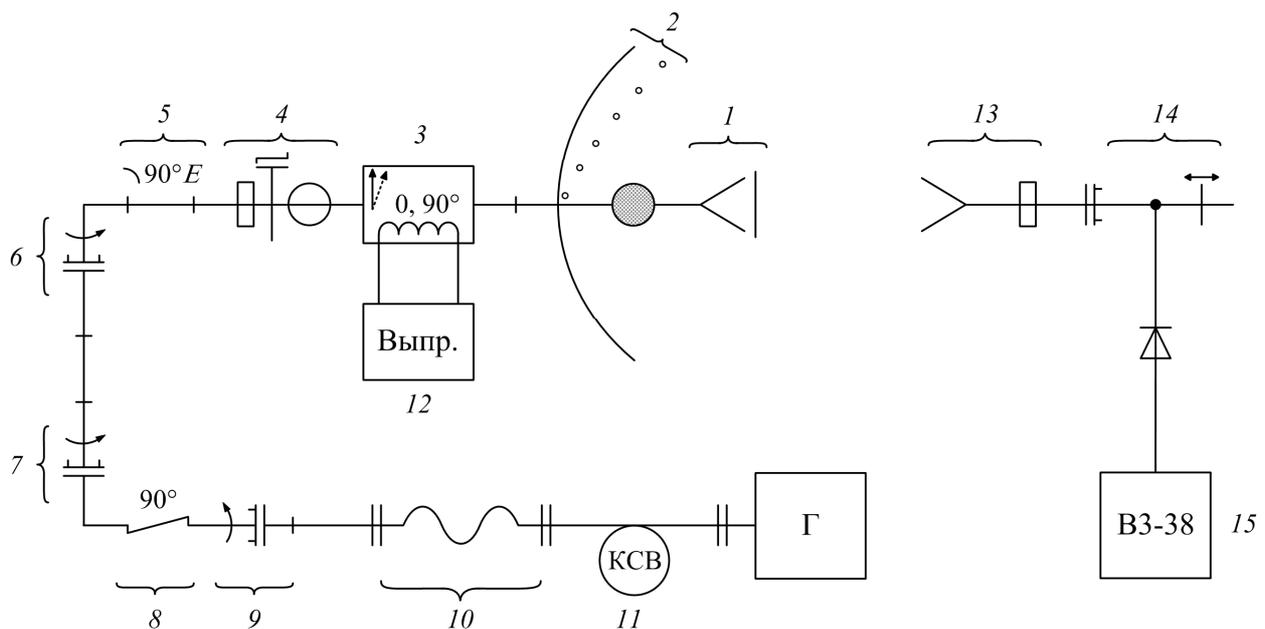


Рис. 7.17. Электрическая схема лабораторной установки: 1 – рупорный излучатель с контррефлектором; 2 – параболическое зеркало с поляризационным фильтром (козырьком); 3 – поляризатор; 4 – ступенчатый переход с круглого на прямоугольный волновод; 5 – изгиб волновода на 90° в E -плоскости; 6 – вращающееся сочленение (по углу места); 7 – вращающееся сочленение (по азимуту); 8 – скрутка волновода на 90° ; 9 – вращающееся сочленение (по углу крена); 10 – волновод гибкий; 11 – прибор для измерения $K_{св}$ (измерительная линия); 12 – регулируемый выпрямитель; 13 – рупорная антенна; 14 – детекторная секция; 15 – измерительный прибор ВЗ-38

Исследуемая зеркальная антенна в лабораторной установке работает только в режиме передачи. Она расположена на одном столе вместе с генератором, прибором для измерения коэффициента стоячей волны, регулируемым выпрямителем и измерительным прибором. Вспомогательная приемная рупорная антенна (см. Приложение Г) укреплена на противоположной стене в семи метрах от зеркальной антенны.

Изменение углового положения исследуемой антенны в лабораторной установке производится вручную путем вращения двух рукояток. Рукоятка перемещения луча по азимуту расположена снизу антенны (см. рис. 7.15), и с ее помощью перемещают антенну за счет вращения вала электромотора азимутального привода; шкала для отсчета азимутального угла укреплена на корпусе антенны. Рукоятка перемещения луча по углу места расположена сбоку от антенны (см. рис. 7.16) на кронштейне, поворачиваемом вместе с зеркалом; указатель угла места с вращающейся шкалой расположен немного правее на том же кронштейне.

Для осуществления указанных перемещений луча в конструкции волноводного тракта антенны предусмотрены два вращающихся сочленения. Кроме того, исследуемая антенна может поворачиваться еще и вокруг продольной оси, что позволяет исключить влияние крена самолета на положение луча в пространстве. В лабораторной установке вращение антенны по углу крена не производится.

Высокочастотная энергия к исследуемой антенне от генератора подается через фидерный тракт прибора, используемый для измерения коэффициента стоячей волны $K_{св}$. Энергия постоянного тока для катушки подмагничивания поляризатора подается от выпрямителя с регулируемым выходом. Выпрямитель имеет стрелочный прибор, показывающий ток через нагрузку.

Для приема излучаемых исследуемой антенной радиоволн используется вспомогательная рупорная антенна, выход которой нагружен на детекторную секцию. Рупорная антенна с помощью кронштейна укреплена на стене, причем конструкция кронштейна позволяет поворачивать антенну вокруг ее

продольной оси и фиксировать через 90° . Поворот рупорной антенны в пределах 90° производится с помощью двух шнуров, прикрепленных к концам рычага, соединенного с фланцем детекторной секции.

Сигнал от приемной рупорной антенны после детектора через экранированный кабель подается на измерительный прибор (милливольтметр ВЗ-38), который установлен рядом с исследуемой антенной. По относительным показаниям милливольтметра ВЗ-38 снимаются диаграммы направленности антенны. Кроме того, милливольтметр может быть подключен к прибору для измерения $K_{св}$ и использоваться для определения входного $K_{св}$ антенны.

Порядок выполнения эксперимента

1. Исследовать зависимость входного $K_{св}$ антенны от угла ее поворота по азимуту и по углу места.

К милливольтметру ВЗ-38 подключают приемную рупорную антенну, и зеркальная антенна устанавливается в положение 0° по азимуту и углу места по максимуму показаний прибора.

С помощью каретки измерительной линии измеряют $K_{св}$ антенны в азимутальной плоскости в секторе углов $\pm 60^\circ$ с шагом в 15° (см. Приложение А), находя показания милливольтметра ВЗ-38 E_{\min}^2 и E_{\max}^2 и вычисляя значение $K_{св}$ по соотношению

$$K_{св} = \sqrt{\frac{E_{\max}^2}{E_{\min}^2}}. \quad (7.12)$$

При каждом новом положении зеркала антенны значение $K_{св}$ определяется путем повторения указанных манипуляций.

Аналогичным образом проводятся измерения $K_{св}$ антенны в угломестной плоскости в секторе углов $\pm 20^\circ$ с шагом в 5° . При этом зеркало устанавливается в положение 0° по азимуту.

Полученные данные заносят в табл. 7.2, и по ним строят графики изменения входного $K_{св}$ антенны от поворота зеркала по азимуту и по углу места. На основе построенных графиков необходимо сделать вывод о качестве вращающихся сочленений.

Таблица 7.2. Экспериментальная зависимость входного $K_{св}$ антенны от угла поворота в азимутальной и угломестной плоскостях

$\varphi_{аз}$, град	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60
$K_{св}$									
$\theta_{ум}$, град	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
$K_{св}$									

2. Исследовать зависимость входного $K_{св}$ антенны от величины тока подмагничивания поляризатора.

При выполнении данного пункта зеркало антенны устанавливается в положение 0° по азимутальному углу и по углу места. После этого включается выпрямитель и измеряется входной $K_{св}$ антенны при изменении подмагничивающего тока от 0 до 100 мА через каждые 10 мА. Полученные данные заносят в табл. 7.3, и по ним строят график изменения входного $K_{св}$ антенны от величины тока подмагничивания поляризатора.

Таблица 7.3. Экспериментальная зависимость входного $K_{св}$ антенны от величины тока подмагничивания поляризатора

I , мА	0	10	20	30	40	50	60	70	...	100
$K_{св}$										

3. Снять диаграммы направленности антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях для вертикально поляризованной волны.

Для этого необходимо проделать следующие манипуляции с установкой:

- а) уменьшить ток выпрямителя до 0, и после этого установить 84 мА;
- б) подключить вход милливольтметра В3-38 к кабелю от приемной рупорной антенны;
- в) приемную рупорную антенну повернуть в положение для приема вертикально поляризованной волны (при этом наибольшая сторона раскрыва рупора должна быть установлена горизонтально).

После проведения предварительных операций приступают к снятию диаграммы направленности в горизонтальной плоскости. Для этого вначале зеркало антенны поворачивают в горизонтальной плоскости до тех пор, пока показания прибора ВЗ-38 не станут равными 0,01...0,02 от максимального значения. Затем, плавно вращая в обратную сторону рукоятку азимутального привода, записывают показания милливольтметра ВЗ-38 через один оборот, которому соответствует угловое смещение зеркала в $0,9^\circ$. Измерения продолжают до тех пор, пока показания прибора после прохождения максимума не упадут до 0,01...0,02 от его величины.

Снятие диаграммы направленности в вертикальной плоскости производится аналогичным образом с интервалом в один оборот рукоятки после установки зеркала антенны в положение максимального излучения по азимутальному углу. Следует иметь в виду, что один оборот рукоятки привода по углу места соответствует угловому перемещению антенны в вертикальной плоскости на $0,55^\circ$.

Измеренные данные заносят в табл. 7.4.

Таблица 7.4. Диаграмма направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях для вертикально поляризованной волны

φ , град										
$f_{\Gamma}^2(\varphi)$										
$f_{\Gamma}(\varphi)$										
$F_{\text{норм } \Gamma}(\varphi)$										
θ , град										
$f_{\text{В}}^2(\theta)$										
$f_{\text{В}}(\theta)$										
$F_{\text{норм В}}(\theta)$										

На основе полученных данных, соответствующих диаграммам направленности «по мощности», после извлечения квадратного корня и их

нормировки в прямоугольной системе координат строятся диаграммы направленности «по полю». Диаграммы направленности в горизонтальной плоскости строятся на том же рисунке, что и теоретическая диаграмма направленности, при этом положения главных максимумов обеих диаграмм совмещают.

4. Снять диаграммы направленности антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях для горизонтально поляризованной волны.

Выполнение этого пункта необходимо начать с установки горизонтальной поляризации излучаемого поля, для чего надо скомпенсировать остаточную намагниченность ферритового стержня поляризатора. Для компенсации остаточной намагниченности производят следующие действия:

- а) уменьшают ток подмагничивания поляризатора до нуля;
- б) меняют полярность проводов, подключенных к выпрямителю;
- в) увеличивают ток до 18 мА.

После установки в излучающей антенне горизонтально поляризованной волны изменяют поляризацию приемного рупора, поворачивая его на 90° . Следует учесть, что положение максимума диаграммы направленности антенны для горизонтальной поляризации немного отличается от положения для вертикальной поляризации.

Далее снимают диаграммы в горизонтальной и вертикальной плоскостях таким же образом, как и в предыдущем пункте; диаграмму направленности в вертикальной плоскости в этом случае можно снимать через два оборота ручки поворота антенны по углу места. Полученные данные заносят в табл. 7.5, и на их основе строят нормированные диаграммы направленности «по полю» на тех же рисунках, на которых построены диаграммы направленности для вертикально поляризованной волны.

Таблица 7.5. Диаграмма направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях для горизонтально поляризованной волны

φ , град										
$f_{\Gamma}^2(\varphi)$										
$f_{\Gamma}(\varphi)$										
$F_{\text{норм } \Gamma}(\varphi)$										
θ , град										
$f_{\text{В}}^2(\theta)$										
$f_{\text{В}}(\theta)$										
$F_{\text{норм В}}(\theta)$										

5. Определить величину поля паразитной поляризации.

Величину поля паразитной поляризации определяют по отношению к величине поля основной поляризации (вначале горизонтальной, а затем вертикальной) в направлении главного максимума.

Для этого устанавливают требуемую поляризацию (п. 3 – для вертикальной поляризации; п. 4 – для горизонтальной поляризации); зеркало антенны возвращается в положение максимального отклонения стрелки милливольтметра ВЗ-38 для основной горизонтальной поляризации поля, и записывают показание прибора $P_{\text{осн}}$.

Поворачивают приемный рупор на 90° , и, вращая зеркало в обеих плоскостях примерно в пределах главного лепестка диаграммы направленности, определяют максимальную величину поля паразитной поляризации $P_{\text{пар}}$ по показаниям милливольтметра ВЗ-38.

Показания милливольтметра ВЗ-38 для поля основной и паразитной поляризации записывают для двух режимов (двух поляризаций) работы исследуемой антенны. После этого относительную величину поля паразитной поляризации для двух режимов вычисляют в процентах по соотношению

$$N = \sqrt{\frac{P_{\text{пар}}}{P_{\text{осн}}}} \cdot 100\% , \quad (7.13)$$

где $P_{\text{пар}}$ и $P_{\text{осн}}$ – измеренные показания для поля паразитной и основной поляризации соответственно.

Требования к отчету

Оформление отчета должно отвечать требованиям, изложенным в разделе «Правила оформления отчета». В отчете должны быть представлены:

- 1) цель работы и электрическая схема лабораторной установки;
- 2) формулы, использованные для теоретического расчета;
- 3) таблицы с расчетными и экспериментальными данными для построения диаграммы направленности исследуемой антенны;
- 4) расчетные данные по КНД и ширине луча исследуемой антенны;
- 5) рисунки со следующими графиками:
 - а) графики $K_{\text{св}}$ в зависимости от углов поворота зеркала антенны;
 - б) график $K_{\text{св}}$ в зависимости от тока подмагничивания;
 - в) график реального амплитудного распределения в раскрыве антенны и аппроксимирующие графики;
 - г) расчетная и две экспериментальные диаграммы направленности в горизонтальной плоскости;
 - д) две экспериментальные диаграммы направленности в вертикальной плоскости;
- 6) выводы по каждому пункту работы и по всей работе в целом.

Контрольные вопросы

1. Принцип работы параболической антенны.
2. Перечислите основные типы облучателей зеркальных антенн и поясните их устройство.
3. Как влияет характер амплитудного распределения поля в раскрыве зеркала на его диаграмму направленности?
4. Какие основные факторы влияют на ширину диаграммы направленности зеркальной антенны?

5. Нарисуйте картину распределения токов на поверхности короткофокусного и длиннофокусного параболического зеркала.

6. Как определяется КНД зеркальной антенны? Какие основные факторы влияют на величину КНД?

7. Нарисуйте косекансную диаграмму направленности в полярной и декартовой системах координат; почему в РЛС применяются антенны с косекансной диаграммой направленности?

8. Перечислите известные способы формирования косекансной диаграммы направленности зеркальных антенн.

9. Почему у параболических антенн возникает поле с паразитной поляризацией?

10. На каком явлении основана работа поляризатора?

11. Поясните устройство поляризатора.

12. В каких направлениях поле паразитной поляризации параболической антенны наименьшее?

13. Поясните принцип работы пластмассового козырька зеркальной антенны с основой из системы параллельных проводников.

14. Какого порядка уровень первых боковых лепестков диаграммы направленности параболического зеркала с равномерным амплитудным распределением в его раскрыве?

15. Оцените ширину диаграммы направленности параболического зеркала диаметром 1 м, работающего на длине волны 5 см.

Приложение А. Описание измерительной линии

Измерительная линия Р1-27 (Р1-28) (рис. А.1.) предназначена для измерения коэффициента отражения в устройствах, имеющих стандартный волноводный вход сечением $28,5 \times 12,06$ (23×10) мм. Она представляет собой отрезок волновода, имеющий продольную щель посередине широкой стенки волновода. Через щель во внутреннюю полость волновода проходит тонкий металлический зонд, укрепленный на каретке, которая перемещается вдоль линии. Зонд связан с настраиваемой измерительной головкой. В измерительную головку включен детектор. При тщательной настройке измерительной головки повышается чувствительность линии и уменьшаются ошибки, вносимые в измерения. Перемещение зонда вдоль линии позволяет определить положение максимумов и минимумов напряженности в линии и их относительные величины.

В качестве индикаторных приборов с этой линией могут использоваться различные измерительные приборы: измерительные усилители, микроамперметр постоянного тока, милливольтметр постоянного напряжения. Вследствие наличия в детекторной секции выпрямительного диода и малой выходной мощности генератора электромагнитного излучения СВЧ показания измерительного прибора квадратичны относительно величины поля волны в волноводе и вследствие этого прямо пропорциональны самой мощности.

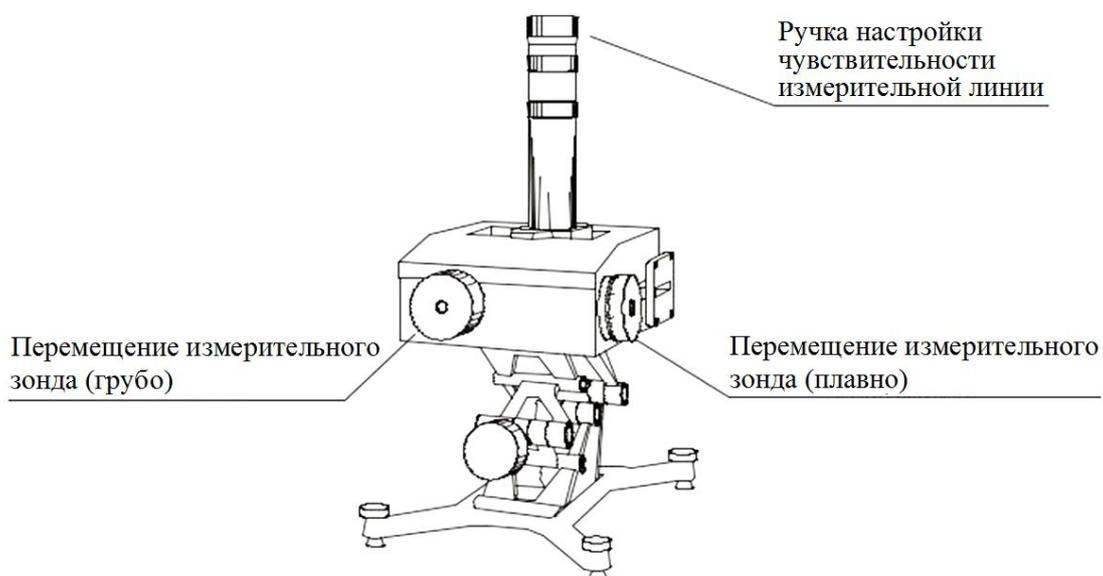


Рис. А.1. Внешний вид измерительной линии

Диапазон рабочих частот для измерительной линии P1-27 (P1-28) составляет 6,85...9,93 ГГц (8,24...12,05 ГГц).

Измерительная головка 2 (рис. А.2.) устроена таким образом, что имеется возможность регулировать глубину погружения зонда в волновод за счёт осевого перемещения стержня 5. Кроме того, в головке можно компенсировать реактивную составляющую сопротивления зонда и добиваться наилучших условий для работы полупроводникового детектора. Для осуществления двух последних регулировок в конструкции головки предусмотрены перестраиваемый контур зонда и перестраиваемый контур детектора. Контур зонда представляет собой коаксиальную линию, образованную стержнем 5 и внутренней трубкой 8. Перестройка контура производится перемещением закорачивающего поршня 4. Контур детектора также представляет собой коаксиальную линию, образованную внутренней трубкой 8 и внешней трубкой 9. Перестройка контура производится перемещением закорачивающего поршня 3. В качестве детектора в головке используется полупроводниковый диод.

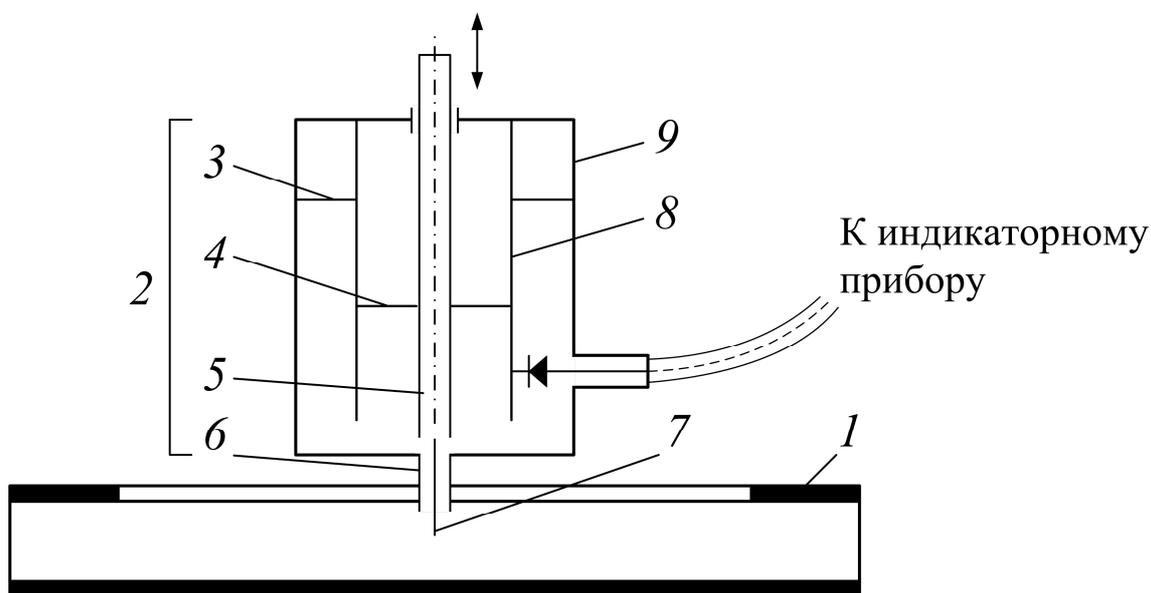


Рис. А.2. Схема устройства измерительной линии:

- 1 – прямоугольный волновод с прорезанной щелью; 2 – измерительная головка;
3 – поршень контура детектора; 4 – поршень контура зонда; 5 – стержень;
6 – экран зонда; 7 – зонд; 8 – внутренняя трубка; 9 – внешняя трубка

Перемещение каретки вместе с измерительной головкой 2 осуществляется вращением ручки грубого перемещения и ручки плавного перемещения. Величина перемещения каретки отмечается по нониусу, на который указывает стрелка каретки. Погружение поршня контура зонда и контура детектора осуществляется соответствующими регулировочными гайками (ручками настройки чувствительности).

Подготовка измерительной линии к работе заключается в установке необходимой глубины погружения зонда и настройке измерительной головки в резонанс. Первоначально глубина погружения зонда устанавливается равной 2...3 мм, после чего головка настраивается в резонанс по наибольшему показанию индикаторного прибора сперва перемещением поршня контура зонда, а затем – перемещением поршня контура детектора. Указанные операции настройки головки следует повторить до получения наибольших показаний индикаторного прибора. После этого, проведя пробное перемещение каретки вдоль линии, необходимо установить наименьшую глубину погружения зонда, которая допускается мощностью генератора, чувствительностью индикаторного прибора и чувствительностью измерительной линии. При изменении глубины погружения зонда требуется снова провести настройку индикаторной головки в резонанс.

При работе с линией должны выполняться следующие рекомендации, несоблюдение которых может увеличить ошибки измерений:

1. Соединять волноводные фланцы следует тщательно, без перекосов и смещений.

2. Между генератором и линией обязательно должен быть либо развязывающий аттенюатор (с затуханием порядка 5...10 дБ), не вносящий в тракт значительных отражений, либо вентиль.

3. Глубину погружения зонда следует уменьшать настолько, насколько позволяет мощность генератора и чувствительность установки.

4. Для уменьшения реакции зонда на поле в волноводе измерительная головка линии должна быть настроена в резонанс.

5. Вольт-амперные характеристики диода могут заметно отличаться от квадратичных, меняться от экземпляра к экземпляру и, кроме того, зависеть от уровня мощности. Поэтому при точных измерениях следует применять метод, использующий градуированный аттенюатор, метод половинного деления («метод вилки»), либо предварительно снимать характеристику детектора.

6. В ряде случаев в детекторный контур могут просачиваться электромагнитные колебания через кабель, соединяющий измерительную головку линии с индикаторным прибором. Для проверки степени просачивания необходимо полностью приподнять зонд из волновода. При просачивании паразитной энергии показания индикаторного прибора не уменьшаются целиком до нуля, как это должно быть. В этом случае в цепь между детектором и индикаторным прибором необходимо включить специальный высокочастотный фильтр, который имеется в комплекте измерительной линии.

Измерение КСВн методом максимума-минимума

Каретка зонда измерительной линии устанавливается в минимуме поля и записываются показания измерительного прибора (E_{\min}^2). Затем зонд перемещают в ближайшую пучность поля и записываются показания измерительного прибора (E_{\max}^2). После чего вычисляется значение коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВн) из соотношения

$$\text{КСВн} = \sqrt{\frac{E_{\max}^2}{E_{\min}^2}}. \quad (\text{A.1})$$

Расчёты по этой формуле можно проводить только для таких величин напряжения на детекторе, при которых его можно считать квадратичным.

Измерение КСВн при помощи градуированного аттенюатора

Каретка зонда измерительной линии устанавливается в минимуме поля и записываются положения градуированного аттенюатора α_1 в децибелах. Затем зонд перемещают в ближайшую пучность поля и с помощью выходного

аттенюатора добиваются на измерительном индикаторе значения поля, равного значению поля в минимуме α_2 . Значение КСВн определяется как разность показаний аттенюатора

$$\text{КСВ}_{\text{ндБ}} = \alpha_2 - \alpha_1. \quad (\text{А.2})$$

Соответственно, $\text{КБВ}_{\text{дБ}} = -\text{КСВ}_{\text{ндБ}} = \alpha_1 - \alpha_2$.

Величина КСВн в виде отношения напряжений в линии определяется из соотношения

$$\text{КСВ}_{\text{н}} = 10^{0,05 \cdot \text{КСВ}_{\text{ндБ}}} = 10^{0,05(\alpha_2 - \alpha_1)}.$$

Измерение высоких значений КСВн («метод вилки»)

При измерении малых значений применяется методика, использующей форму кривой напряженности поля в области минимума (рис. А.3). Величина КСВн в этом случае вычисляется по формуле

$$\text{КСВ}_{\text{н}} = \frac{\sqrt{\frac{E_{\Delta}^2}{E_{\text{мин}}^2} - \cos^2\left(\frac{360^\circ}{\lambda_{\text{л}}}\Delta z\right)}}{\sin\left(\frac{360^\circ}{\lambda_{\text{л}}}\Delta z\right)}. \quad (\text{А.3})$$

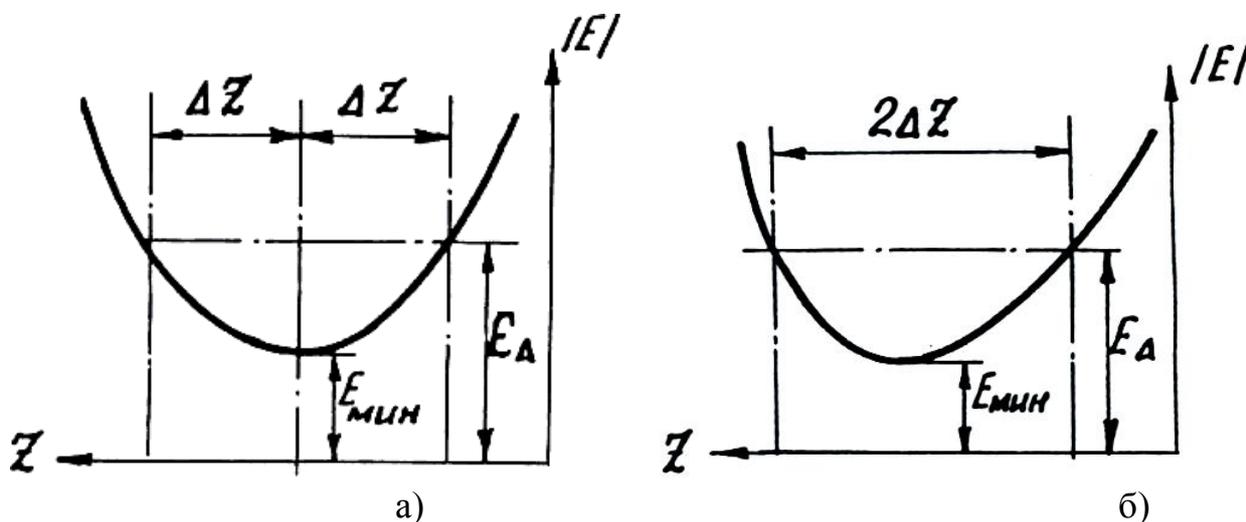


Рис. А.3. Форма кривой напряженности поля в области минимума:
 а – для идеальной измерительной линии; б – для реальной измерительной линии

При измерениях величину E_{Δ}^2 обычно берут в 1,5...2 раза больше $E_{\text{мин}}^2$. Реальная измерительная линия вследствие различных погрешностей искажает форму кривой напряженности поля в области минимума, поэтому величину Δz

берут в виде половины расстояния между положениями двух значений E_{Δ} . Из рис. А.3 видно, что по показаниям прибора фиксация положений E_{Δ} , находящихся на склонах кривой, происходит точнее, чем E_{\min} , расположенного на пологой части кривой. Указанный метод определения КСВн использующий данные измерений по трем точкам, иногда называют «методом вилки».

При измерении КСВн по форме минимума напряжения часто используют то обстоятельство, что в области малых напряжений характеристика кристаллического детектора близка к квадратичной. В этом случае в формулу (А.3) вместо отношения напряженностей в квадрате подставляют отношение

показаний измерительного прибора $\frac{I_{\Delta}}{I_{\min}}$, так как прибор показывает значение

$$\frac{E_{\Delta}^2}{E_{\min}^2}.$$

Приложение Б. Определение характеристик направленности антенны

Снятие диаграммы направленности

Величина напряженности поля, излучаемого антенной, зависит от положения точки наблюдения. Функциональное описание этой зависимости производят в сферической системе координат (R, θ, φ) , центр которой находится в электрическом центре антенны. Для дальней зоны, т.е. на расстояниях R , во много раз больших рабочей длины волны λ и наибольшего излучающего размера антенны D , величину напряженности поля можно описать формулой

$$E = \frac{E_{\max}}{R} F(\theta, \varphi). \quad (\text{Б.1})$$

Функцию $F(\theta, \varphi)$, описывающую зависимость амплитуды поля от угловых координат, называют амплитудной характеристикой направленности антенны, или сокращенно – характеристикой направленности антенны. Графическое изображение характеристики направленности называют диаграммой направленности.

Амплитудные диаграммы направленности (например, в плоскости угла θ) строят как в полярной, так и в прямоугольной системе координат (рис. Б.1), по модулю. Вопрос о том, в какой системе координат строить диаграмму направленности, определяет ее ширина. Для широких диаграмм направленности (примерно 30° и более) наглядней изображение получается в полярной системе координат, а для узких диаграмм направленности – в прямоугольной.

Довольно часто при построении диаграммы направленности в любой системе координат возникает задача точного изображения относительно малого уровня боковых лепестков. В этом случае для отсчета величины $F(\theta, \varphi)$ применяют логарифмический масштаб.

При работе антенны в режиме приема характеристика направленности описывает изменение напряжения (или тока) на входе антенны в зависимости от направления прихода электромагнитной волны. В соответствии с принципом

взаимности характеристика направленности антенны при работе на передачу и прием одна и та же. Это обстоятельство позволяет снимать диаграмму направленности антенны в режиме передачи или приема в зависимости от того, что более удобно.

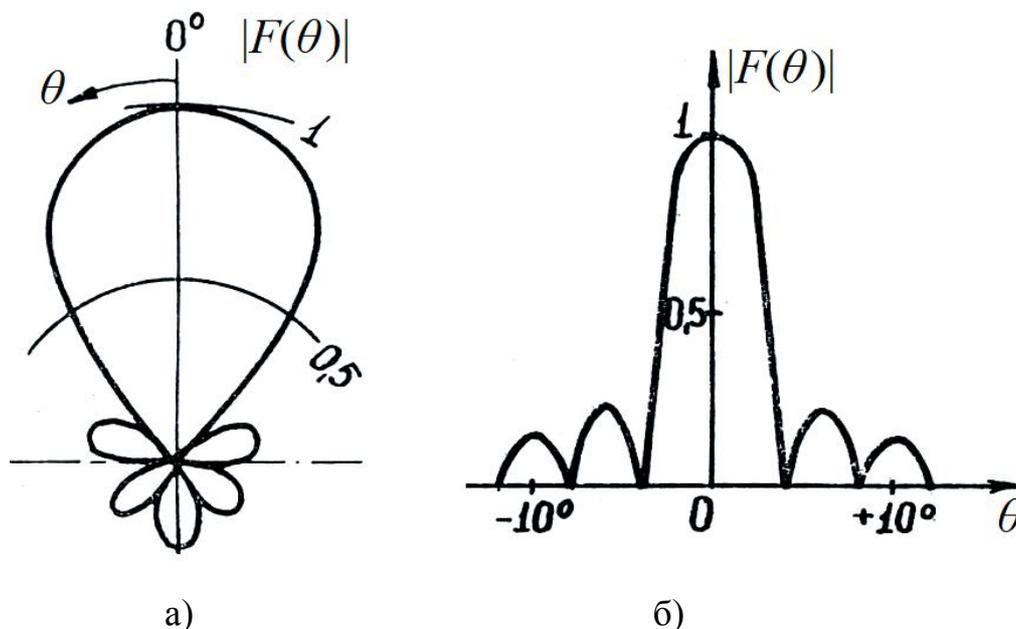


Рис. Б.1. Амплитудные диаграммы направленности:

а – в полярной системе координат; б – в прямоугольной системе координат

Для снятия диаграммы направленности антенны в любом режиме необходима вторая (вспомогательная) антенна (рис. Б.2). Для исследуемой антенны направление на вторую антенну меняется, а для вспомогательной антенны оно постоянно; при этом расстояние между двумя антеннами остается неизменным.

При снятии диаграммы направленности необходимо определить, с каким интервалом изменять координатный угол и на каком расстоянии располагать антенны.

Первый вопрос связан с шириной главного лепестка диаграммы направленности антенны. Построение главного лепестка, а также боковых лепестков диаграммы направленности следует производить по достаточному числу экспериментальных точек.

Для наиболее точного построения диаграммы направленности в пределах главного лепестка необходимо иметь 12...16 экспериментально полученных точек. Для этого в начале эксперимента производят предварительное определение ширины главного лепестка «по нулям», и $\frac{1}{12} \dots \frac{1}{16}$ этой величины укажет на максимальный интервал изменения угла θ . Положение нулей диаграммы направленности при эксперименте фиксируют по возможности точнее.

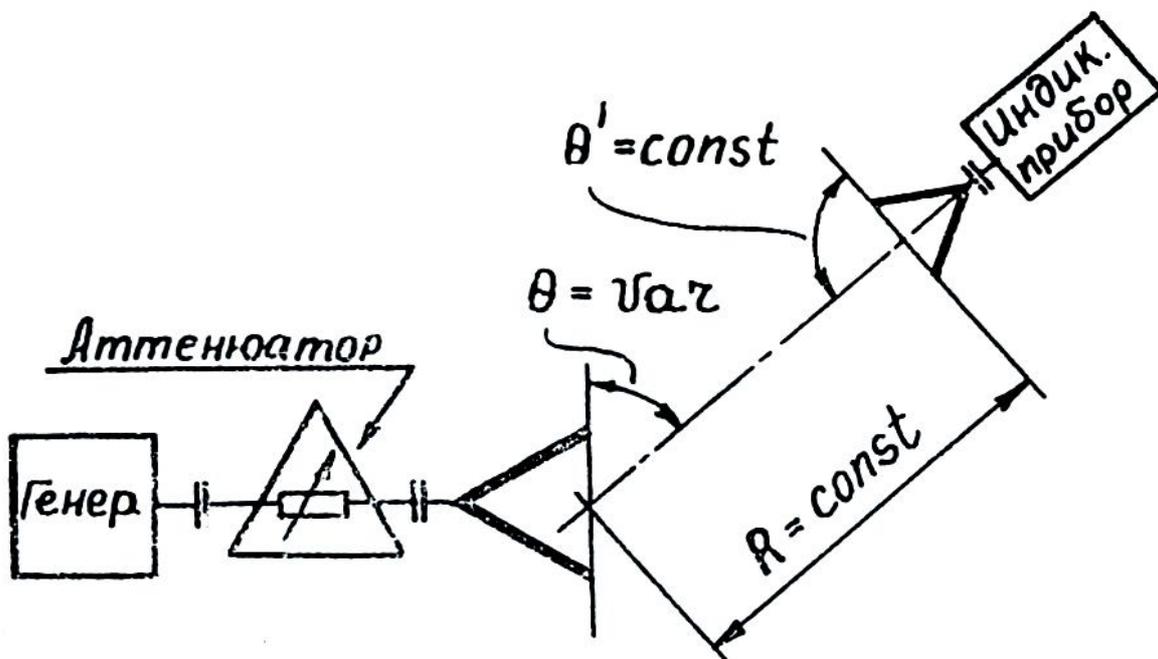


Рис. Б.2. Схема установки для снятия диаграммы направленности

Интервал изменения угла $\Delta\theta$ до эксперимента приближенно можно оценить по формулам, поскольку обычно размер излучающего раскрытия D антенны и рабочая длина волны λ известны. Ширину луча большинства антенн по нулевому уровню определяют по формуле

$$2\theta_0 \approx 120 \frac{\lambda}{D}, \text{ град.} \quad (\text{Б.2})$$

Следовательно, интервал изменения угла $\Delta\theta_0 \leq 10 \frac{\lambda}{D}$.

Выбор необходимого расстояния между антеннами связан с фазовой и амплитудной ошибками в их раскрывах. Вследствие сферичности фронта волны, излученной антенной с размером раскрыва d (рис. Б.3,а), раскрыв D приемной антенны будет возбуждаться несинфазно. В случае, когда размер раскрыва одной антенны намного больше размера раскрыва другой антенны ($D \gg d$), амплитудную ошибку можно не учитывать. Фазовая ошибка будет допустимой (меньше $\pi/8$), если расстояние между антеннами выбрать из соотношения

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}. \quad (\text{Б.3})$$

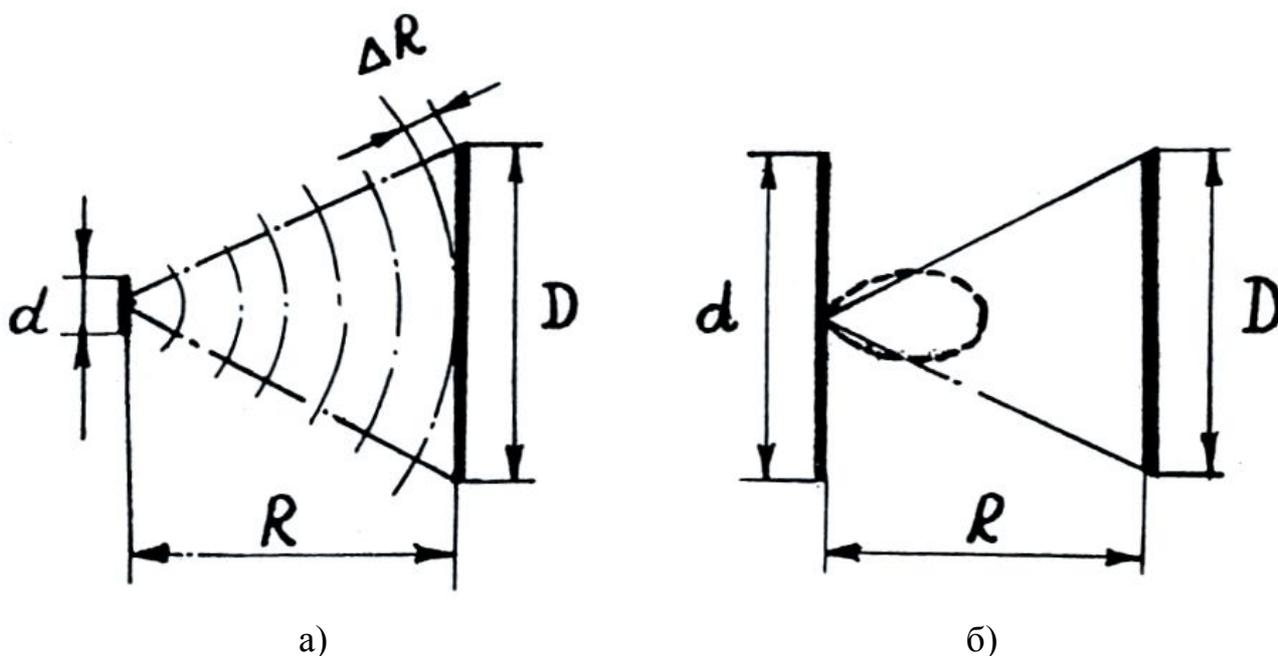


Рис. Б.3. Схема для определения расстояния между антеннами при измерении диаграммы направленности: *а* – с учетом только фазовой ошибки; *б* – с учетом только амплитудной ошибки

В случае антенн с соизмеримыми размерами раскрывов к фазовой ошибке добавляется еще амплитудная ошибка. Последняя возникает вследствие того, что равномерность возбуждения раскрыва приемной антенны зависит от ширины диаграммы направленности передающей антенны (рис. Б.3,б). Влияние указанных ошибок становится незначительным, если диаграмму направленности снимать на расстоянии

$$R \geq \frac{2(D+d)^2}{\lambda}. \quad (\text{Б.4})$$

При измерениях диаграммы направленности антенн надо иметь в виду, что характеристики детекторов, применяемых в индикаторных приборах, нелинейны. В первом приближении характеристики кристаллических детекторов можно считать квадратичными, и тогда данные индикаторных приборов будут соответствовать диаграммам направленности «по мощности», т.е. $F^2(\theta, \varphi)$.

При точных измерениях диаграммы направленности влияние нелинейности характеристики детектора можно избежать за счет применения градуированного аттенюатора (рис. Б.2), включенного в любое место высокочастотного тракта установки. В этом случае измерения уровня сигнала ведутся путем изменения затухания, вносимого аттенюатором. Перед измерениями вспомогательную антенну устанавливают в направлении главного максимума диаграммы направленности исследуемой антенны. Регулировка аттенюатора состоит в установке его в положение максимального затухания, величина которого определяется чувствительностью принимаемой аппаратуры и удобным положением стрелки индикаторного прибора. При снятии диаграммы направленности за счет уменьшения затухания аттенюатора стрелка индикаторного прибора возвращается к первоначальному положению. Данные об измерении уровня сигнала считываются со шкалы градуированного аттенюатора (с учетом градуировочного графика) в децибелах, которые затем можно пересчитать в относительные величины. При таком способе измерения диаграммы направленности рабочий режим детектора неизменен и вид его характеристики не имеет значения.

Измерение коэффициента усиления антенн

Для измерения коэффициента усиления (КУ) антенн с применением эталонной антенны используют ту же схему установки, что и для снятия диаграммы направленности. Минимально допустимое расстояние между

антеннами также определяется по формуле (Б.4). Поскольку на КУ антенн сказываются фазовые и амплитудные ошибки в обеих плоскостях, то в формулу (Б.4) необходимо подставить наибольшие размеры раскрывов антенн.

При измерении КУ вспомогательную антенну устанавливают в направлении главного максимума исследуемой антенны с неизвестным коэффициентом усиления G_x . После записи показаний индикаторного прибора α_x исследуемую антенну заменяют на эталонную с известным коэффициентом усиления $G_{эт}$. При квадратичной характеристике детектора изменения в показаниях индикаторного прибора будут прямо пропорциональны изменению КУ при перемене антенн:

$$G_x = G_{эт} \frac{\alpha_x}{\alpha_{эт}}, \quad (\text{Б.5})$$

где $\alpha_{эт}$ – показания индикаторного прибора при использовании эталонной антенны.

При применении градуированного аттенюатора измерение отношения $\frac{\alpha_x}{\alpha_{эт}}$ производится точнее. Поэтому при точных измерениях КУ предпочтительнее пользоваться аттенюатором. Если КУ необходимо измерить очень точно, то учитывают величины отраженных мощностей от входов исследуемой и эталонной антенн. Обычно эти отражения малы и при измерениях их не учитывают.

В качестве индикаторного прибора в лаборатории используется милливольтметр ВЗ-38.

Измерение при помощи милливольтметра ВЗ-38

Аналоговый милливольтметр переменного тока ВЗ-38 (рис. Б.4) предназначен для измерения величины напряжения переменного тока в диапазоне 100 мкВ...300 В частотой 20 Гц...5 МГц.

В милливольтметре ВЗ-38 имеется детектор среднего значения. Шкала прибора проградуирована в среднеквадратических значениях синусоидального

напряжения. Прибор ВЗ-38 удобен для измерения затуханий и частотных характеристик по шкале, проградуированной в децибелах (0 дБ – 0,775 В).



Рис. Б.4. Милливольтметр ВЗ-38 (передняя панель)

Предел допускаемой основной погрешности прибора, выраженный в процентах от верхнего предела установленного поддиапазона измерения, равен $\pm 2,5\%$. Входная емкость: 30 пФ (1...300 мВ) и 15 пФ (1...300 В). Входное сопротивление: 5 МОм (1...300 мВ) и 4 МОм (1...300 В).

На его передней панели имеются:

- стрелочный прибор, по положению стрелки которого отсчитывается входное напряжение;
- входной разъём для подачи измеряемого напряжения;
- переключатель пределов измерения напряжения;
- выключатель сети и индикатор включения.

Для начала работы необходимо включить прибор в сеть, щёлкнуть вверх сетевым выключателем и дать прибору прогреться 5 минут.

Устанавливаем переключатель пределов на значение, немного превышающее предполагаемую величину измеряемого напряжения. Например, если планируется измерять напряжение примерно 1...2 В, ставим переключатель на «3 V» (как на рис. Б.4).

Важно! Предел измерения прибора обозначает величину напряжения, подаваемого на вход, при котором стрелка прибора отклонится до максимального (крайнего правого) положения.

Подаём на вход прибора измеряемое напряжение. Стрелка его отклонится и покажет величину поданного напряжения. Если стрелка ушла вправо за границу шкалы (зашкалила), то входное напряжение больше установленного предела, нужно переключатель пределов переключить на больший предел; если стрелка отклонилась меньше, чем четверть шкалы, то нужно переключиться на меньший предел, иначе будет велика погрешность измерения.

По какой шкале производить отсчёт? Верхняя шкала имеет деления до 10, по ней удобно измерять на пределах, кратных 10; средняя шкала имеет деления до 30, по ней удобно измерять на пределах, кратных 3. На нижнюю шкалу для ясности не будем обращать внимания – для лабораторных работ она не требуется.

На рис. Б.4 переключатель пределов стоит в положении «3 V», значит, считывать показания будем по средней шкале. По ней стрелка максимально может отклониться до числа 30 при входном напряжении 3 В, т.е. значение, которое стрелка показывает на средней шкале (рис. Б.4), нужно разделить на 10. Тогда получим величину измеряемого напряжения. В нашем случае стрелка показывает «21», считаем: $21/10 = 2,1$ В.

Приложение В. Свойства и значения Λ -функции

Лямбда-функция n -го порядка определяется соотношением

$$\Lambda_n(x) = n! \left(\frac{2}{x}\right)^n J_n(x), \quad (\text{В.1})$$

где $J_n(x)$ – функция Бесселя n -го порядка.

При расчете диаграмм направленности реальных антенн с помощью Λ -функций обыкновенно $n \leq 3$. В качестве иллюстрации на рис. В.1 приведены графики Λ -функции 1-го, 2-го и 3-го порядков.

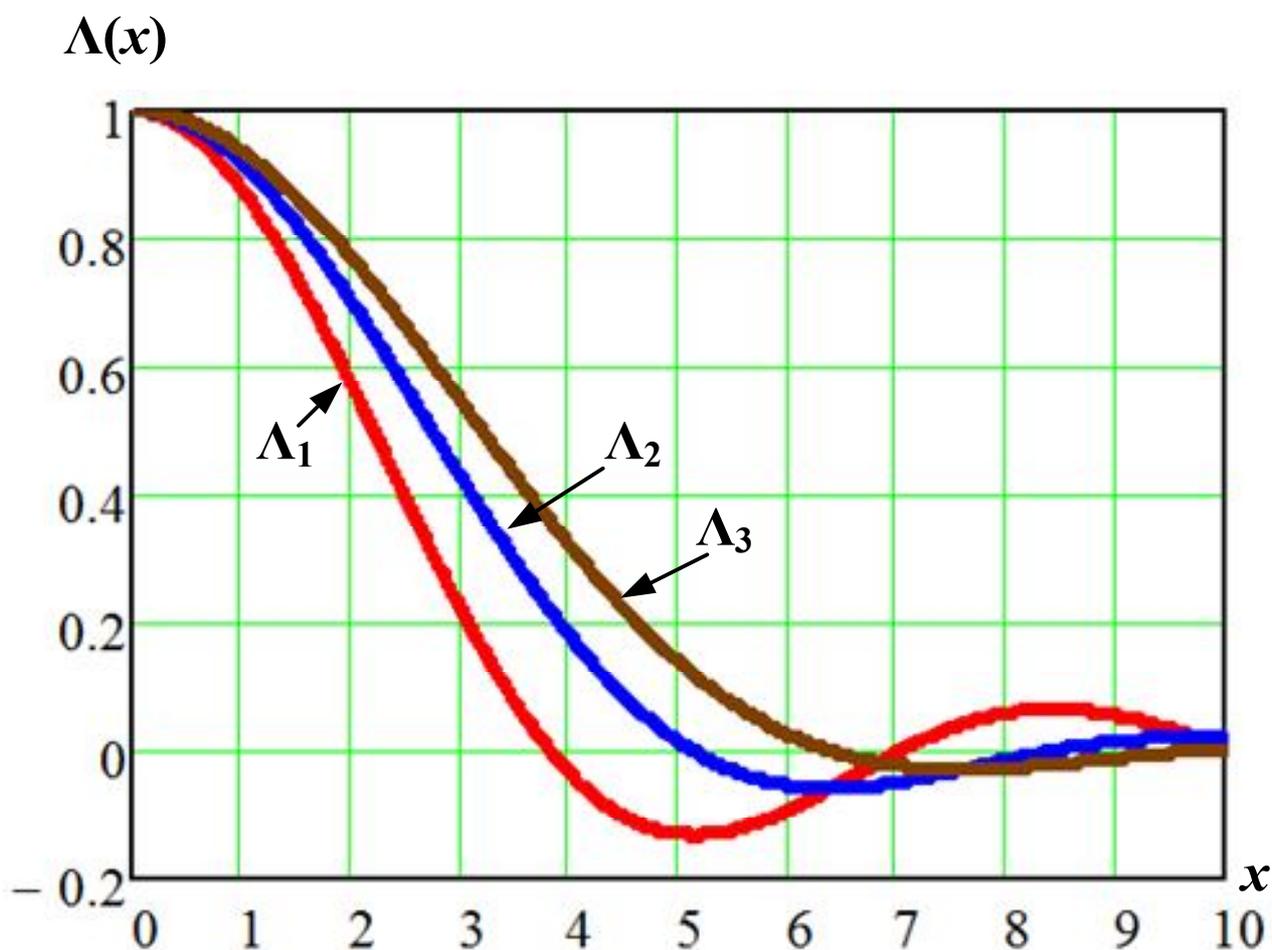


Рис. В.1. Λ -функция 1-го, 2-го и 3-го порядков

Приложение Г. Вспомогательная рупорная антенна

Основным элементом рупорной антенны является стандартный пирамидальный рупор с размерами раскрыва 90×135 см, длиной 160 см, с входным волноводом сечением 23×10 мм на длине волны 3,2 см, коэффициент усиления рупора равен примерно 90.

Высокочастотная энергия от генератора к антенне подается с помощью гибкого коаксиального кабеля с волноводным выходом сечением 23×10 мм. Вспомогательная рупорная передающая антенна имеет два варианта крепления к стене (рис. Г.1 и рис. Г.2).

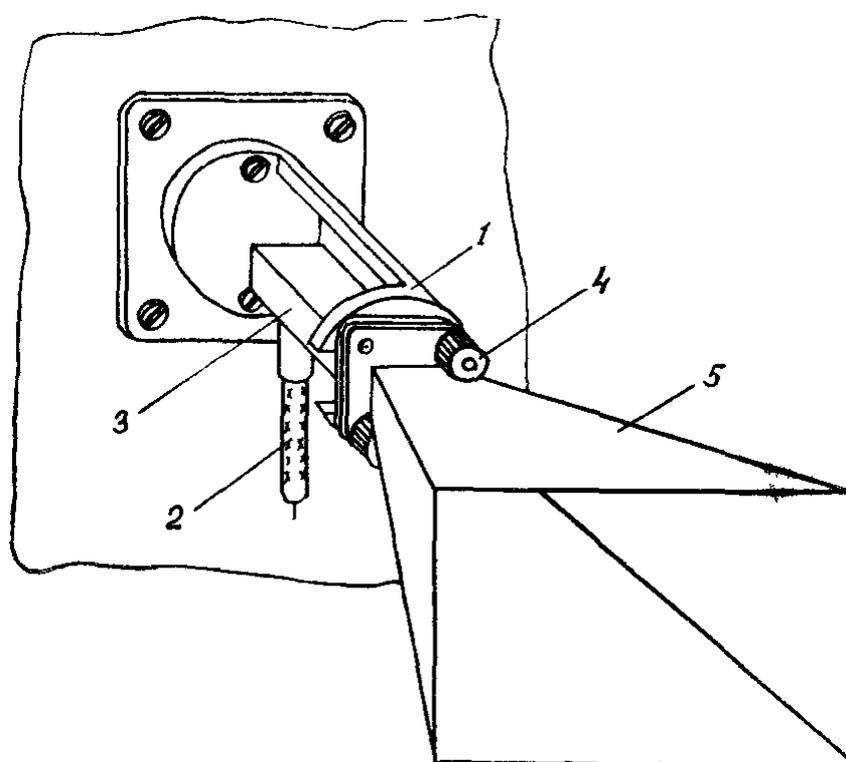


Рис. Г.1. Первый вариант вспомогательной передающей рупорной антенны:

1 – втулка, укрепленная на стене; 2 – гибкий коаксиальный кабель; 3 – волноводный выход кабеля; 4 – крепежные гайки; 5 – пирамидальный рупор

Варианты рупорной антенны отличаются друг от друга конструкцией узла крепления. В первом варианте (рис. Г.1) фланец рупора и фланец волноводного выхода коаксиального кабеля посажены на двух шпильках неподвижной втулки, укрепленной на стене. В этом варианте для изменения плоскости

поляризации излученного поля на 90° необходимо отвернуть две круглые с накаткой крепежные гайки, снять оба волноводных фланца со шпилек, и после их поворота вокруг продольной оси на 90° надеть другими отверстиями на шпильки и затянуть крепежными гайками.

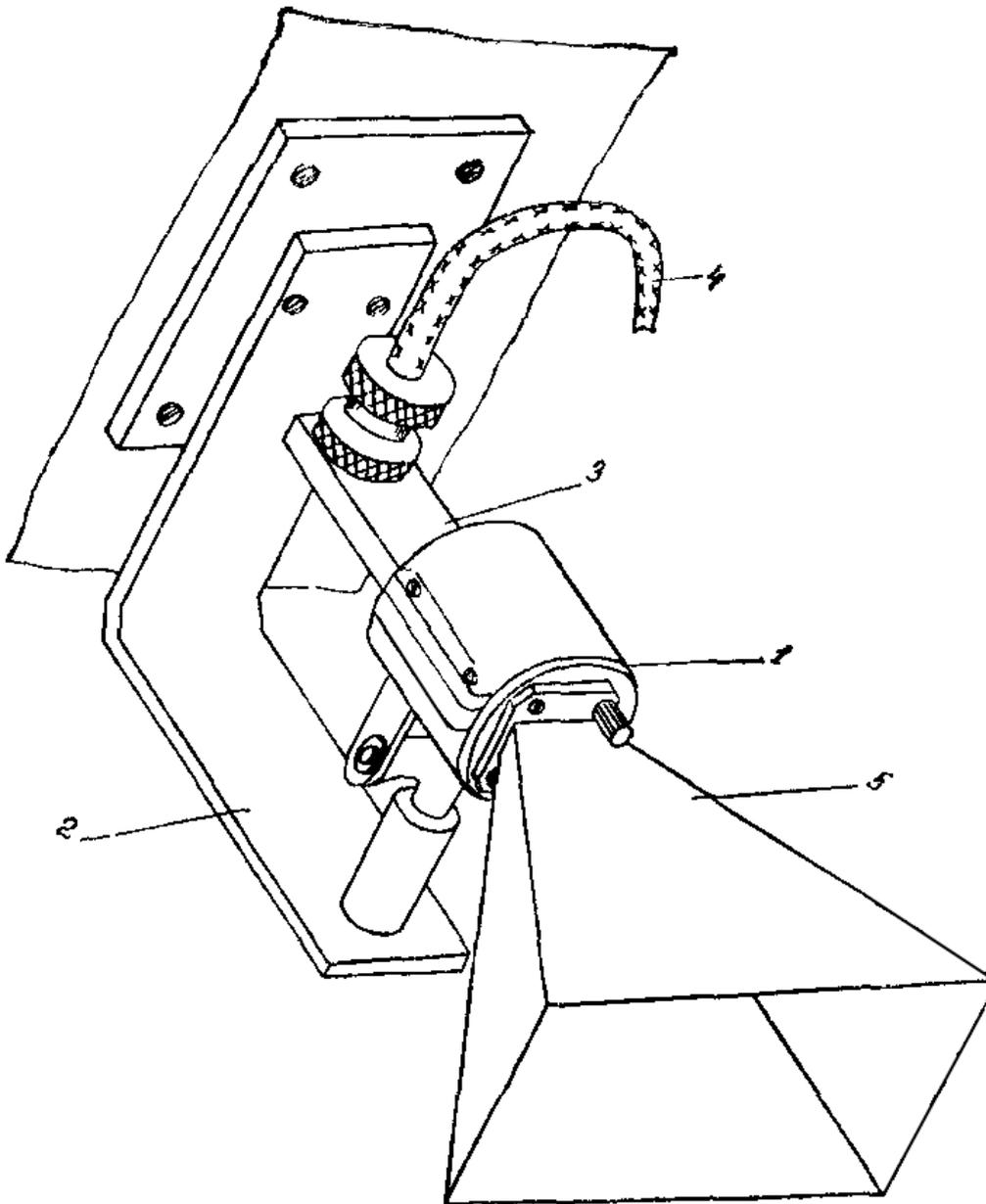


Рис. Г.2. Второй вариант вспомогательной передающей рупорной антенны:
1 – головка с вращающейся втулкой; 2 – кронштейн, укрепленный на стене;
3 – волноводный выход гибкого коаксиального кабеля; 4 – гибкий коаксиальный кабель; 5 – пирамидальный рупор

Во втором варианте антенны (рис. Г.2) рупор и волноводный выход коаксиального кабеля посажены на шпильки вращающейся втулки специальной головки. В данном варианте для изменения плоскости поляризации излучаемого поля на 90° необходимо сам рупор с некоторым усилием повернуть на четверть оборота. Вращающаяся втулка головки через каждые четверть оборота стопорится специальными пружинными фиксаторами с западающими шариками.

Содержание

Цель работы	2
Теоретическая подготовка к работе	2
Расчетное задание и расчетные формулы	26
Экспериментальная часть	28
Описание лабораторной установки	28
Порядок выполнения эксперимента	31
Требования к отчету	36
Контрольные вопросы	36
Приложение А. Описание измерительной линии	38
Приложение Б. Определение характеристик направленности антенны	44
Снятие диаграммы направленности	44
Измерение коэффициента усиления антенн.....	48
Измерение при помощи милливольтметра ВЗ-38	49
Приложение В. Свойства и значения Λ-функции	52
Приложение Г. Вспомогательная рупорная антенна	53

Литература

-
- 1 Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. и др. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника. 2016.
 - 2 Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио. 1974.
 - 3 Лавров А.С., Резников Г.Б. Антенно-фидерные устройства. М.: Сов. радио. 1974.
 - 4 Жук М.С., Молочков Ю.В. Проектирование антенно-фидерных устройств. М.: Энергия. 1966.