

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

Лабораторная работа № 12.

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ
С КОСЕКАНСКОЙ ДИАГРАММОЙ
НАПРАВЛЕННОСТИ**

Работа № 12. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ С КОСЕКАНСКОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

Цель работы

1. Изучить принцип работы и устройство зеркальной антенны с косекансной диаграммой направленности; расчет направленных свойств антенны.
2. Экспериментально исследовать зависимость коэффициента стоячей волны в волноводном тракте от углов поворота зеркала.
3. Экспериментально изучить диаграммы направленности антенны и определить величину поля паразитной поляризации.

Теоретическая подготовка к работе

Перед выполнением работы необходимо изучить теорию зеркальных (параболических) антенн и способы формирования косекансных диаграмм направленности. Теория зеркальных антенн изложена в лекциях по курсу «Устройства СВЧ и антенны»; этот же материал можно найти в [1–4], а также в описании к лабораторной работе № 7. Кроме того, необходимо изучить описание измерительной линии (Приложение А) и определение характеристик направленности антенн (Приложение Б).

В работе исследуется зеркальная антенна в виде параболического зеркала с «козырьком» и щелевым облучателем. Эта антенна является частью самолетной радиолокационной станции, работающей в трехсантиметровом диапазоне волн. Антенна создает остронаправленную диаграмму направленности в горизонтальной плоскости (по азимуту) и косекансную в вертикальной плоскости (по углу места).

Расчетное задание и расчетные формулы

При подготовке к работе необходимо рассчитать диаграмму направленности антенны с зеркалом диаметром 74 см в горизонтальной

(азимутальной) плоскости и ее коэффициент направленного действия. Исходные данные для расчетного задания приведены в табл. 12.1 для четырех вариантов, отличающихся длиной волны λ . Номер варианта выбирается в соответствии с графиком проведения лабораторных работ.

Таблица 12.1. Исходные данные для расчета

| № варианта | 1 | 2 | 3 | 4 |
|----------------|------|-----|------|-----|
| λ , см | 3,15 | 3,2 | 3,25 | 3,3 |

Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости «по полю» рассчитывается по приближенной формуле для синфазного круглого раскрыва со спадающим к краям амплитудным распределением

$$f(u) = \Lambda_{p+1}(u), \quad (12.1)$$

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

Приложение В); p – параметр аппроксимирующей функции; $u = \frac{2\pi R}{\lambda} \sin\theta$ – обобщенный аргумент, в котором угол θ отсчитывается от оси параболоида вращения; R – радиус зеркала.

Параметр p выбирается в зависимости от вида функции, наиболее точно аппроксимирующей реальное амплитудное распределение поля E_s в раскрыве зеркала. Для исследуемого зеркала с щелевым облучателем рекомендуется использовать аппроксимирующую функцию вида

$$\Phi(r) = \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^p, \quad (12.2)$$

где r – координата, изменяющаяся в плоскости раскрыва от центра зеркала до его края.

Параметр p определяется на основе сопоставления по наилучшему совпадению графика реального амплитудного распределения E_s в раскрыве зеркала и графиков аппроксимирующей функции $\Phi(r)$. Для этого строится

график реального амплитудного распределения по данным табл. 12.2 и графики аппроксимирующей функции $\Phi(r)$.

Таблица 12.2. Реальное амплитудное распределение по раскрыву зеркала

| | | | | | | | | |
|----------------|---|------|------|------|------|------|-----|------|
| $r, \text{см}$ | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 37 |
| E_s | 1 | 0,97 | 0,87 | 0,72 | 0,55 | 0,37 | 0,2 | 0,18 |

Расчет диаграммы направленности по формуле (12.1) ведется в пределах $\theta=0\dots5^\circ$ через $0,5^\circ$. Затем диаграмма направленности строится в прямоугольной системе координат для углов $\theta = -5^\circ\dots+5^\circ$. Значения лямбда-функции даны в Приложении В. По построенному графику определяется ширина диаграммы направленности по уровню 0,7 и сравнивается с рассчитанной по приближенной формуле

$$2\theta_{0,7} = K \frac{\lambda}{2R}, \text{ град}, \quad (12.3)$$

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

Коэффициент направленного действия параболической антенны рассчитывается по формуле

$$D = \frac{4\pi S}{\lambda^2} g = D_0 g, \quad (12.4)$$

где $S=\pi R^2$ – геометрическая площадь раскрыва зеркала; $D_0 = \frac{4\pi S}{\lambda^2}$ – коэффициент направленного действия параболического зеркала с равномерным амплитудным распределением; g – результирующий коэффициент использования поверхности (эффективность) зеркальной антенны, учитывающий неравномерность амплитудного распределения зеркала и неполное улавливание зеркалом энергии облучателя; для исследуемого зеркала, имеющего параболическую форму с «козырьком», можно принять $g = 0,7$.

Поляризация электромагнитных волн, излучаемых параболической антенной, зависит от вида и расположения облучателя зеркала. Поле излучения параболической антенны с облучателем, имеющим вертикальные щели, в

основном поляризованное горизонтально, имеет также небольшую вертикальную составляющую вектора E , обуславливающую паразитную, или перекрестную поляризацию.

Относительную величину поля паразитной поляризации можно охарактеризовать (в процентах) величиной

$$N = \frac{E_{\text{пар}}}{E_{\text{осн}}} \cdot 100\%, \quad (12.5)$$

где $E_{\text{пар}}$ – напряженность поля паразитной поляризации (вертикальной) в направлении максимального его значения в пределах главного лепестка; $E_{\text{осн}}$ – напряженность поля основной поляризации в направлении главного максимума.

Экспериментальная часть

Описание лабораторной установки

Общий вид лабораторной установки изображен на рис. 12.1, а на рис. 12.2 показана электрическая схема установки.

Исследуемая зеркальная антенна работает в режиме передачи и расположена на одном столе с генератором 15, прибором 14 для измерения коэффициента стоячей волны (измерительная линия), измерительным прибором 16 типа ВЗ-38. Высокочастотная энергия к исследуемой антенне подается от генератора через волноводный тракт. Приемная рупорная антенна 1 укреплена на противоположной стене в семи метрах от зеркальной антенны.

Зеркало антенны выполнено из дюраля в виде параболоида вращения, в верхней части которого установлен добавочный «козырек», имеющий сферопараболическую поверхность и создающий косекансную часть диаграммы направленности в вертикальной плоскости (по углу места). В фокусе зеркала расположен облучатель 6 в виде объемного резонатора с двумя вертикальными щелями. Возбуждается резонатор прямоугольным волноводом, который сужается по узкой стенке. Это позволяет улучшить согласование

волновода с резонатором и уменьшить расстояние между щелями для обеспечения наиболее равномерного облучения зеркала. На внешней стенке объемного резонатора имеется винт, которым при настройке антенны можно улучшить согласование волноводного тракта с щелевым облучателем.

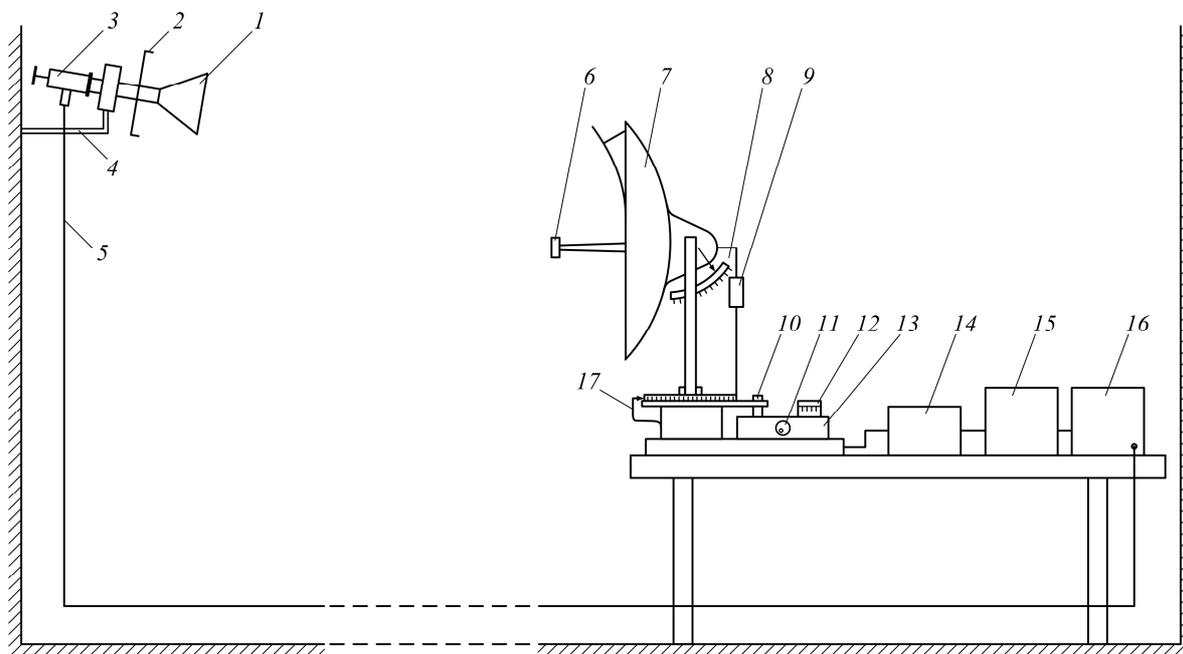


Рис. 12.1. Схематический вид лабораторной установки для исследования зеркальной антенны:

1 – приемная рупорная антенна; 2 – рычаг поворота рупорной антенны; 3 – детекторная секция; 4 – кронштейн с вращающейся втулкой; 5 – экранированный кабель; 6 – щелевой облучатель; 7 – зеркало антенны; 8 – указатель угла места; 9 – муфта тяги наклона зеркала; 10 – гайка механизма сцепления; 11 – рукоятка поворота зеркала в горизонтальной плоскости; 12 – градусный лимб для отсчета углов азимута; 13 – редуктор; 14 – прибор для измерения $K_{св}$ (измерительная линия); 15 – СВЧ-генератор; 16 – милливольтметр ВЗ-38; 17 – грубая шкала углов азимута

Перемещение зеркала антенны при изучении диаграммы направленности производится вручную вращением рукоятки 11 и муфты 9. Перемещение зеркала в горизонтальной плоскости (по азимуту) производится рукояткой 11 с помощью редуктора 13, который расположен в нижней части антенны. Редуктор позволяет поворачивать зеркало без люфта и с большой точностью. На верхней части корпуса редуктора расположены грубый лимб 12 отсчета

углов азимута с ценой деления в один градус, а между рукояткой 11 и корпусом расположен точный лимб с ценой деления в одну минуту. Оба лимба могут поворачиваться от руки для первоначальной установки «на нуль». Входная шестерня редуктора имеет механизм сцепления 10. При отвинчивании гайки механизма сцепления 10 вверх вращающаяся платформа антенны не связана с редуктором, и ее можно свободно поворачивать за стойку зеркала; отсчет углов в этом случае осуществляется по грубой шкале азимута 17. Перемещение зеркала антенны по углу места осуществляется вращением муфты 9 механизма наклона зеркала. Указатель угла места 8 с ценой деления в один градус расположен сбоку от зеркала.

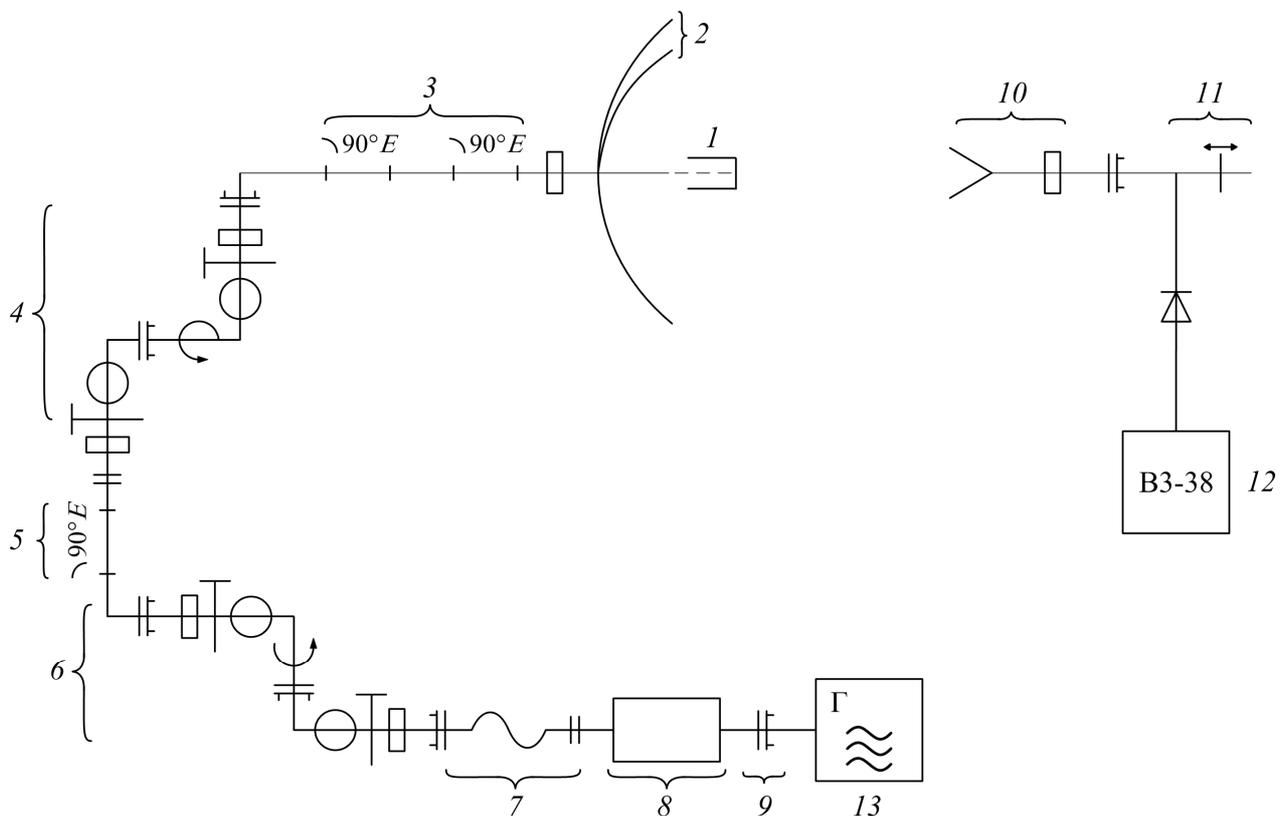


Рис. 12.2. Электрическая схема лабораторной установки: 1 – щелевой облучатель; 2 – параболическое зеркало с козырьком; 3,5 – изгибы волновода на 90° в E -плоскости; 4 – вращающееся сочленение по углу места; 6 – вращающееся сочленение по азимуту; 7 – гибкий волновод; 8 – прибор для измерения $K_{св}$ (измерительная линия); 9 – дроссельно-фланцевое соединение волнопроводов; 10 – приемная рупорная антенна; 11 – детекторная секция; 12 – измерительный прибор (милливольтметр В3-38); 13 – СВЧ-генератор

Для перемещения зеркала антенны в конструкции ее волноводного тракта предусмотрены вращающиеся сочленения азимута и угла места. По технологическим причинам подвижная и неподвижная части вращающихся сочленений не могут быть выполнены строго соосными. Поэтому при вращении антенны меняются условия передачи энергии, и в волноводном тракте меняется величина $K_{св}$. В лабораторной работе для измерения степени согласования используется измеритель $K_{св}$ 14, включенный между генератором и входным фланцем волноводного тракта антенны.

Для приема излучаемого антенной сигнала используется вспомогательная рупорная антенна 1, выход которой нагружен на детекторную секцию 3. Рупорная антенна с помощью кронштейна 4 укреплена на стене, причем конструкция кронштейна позволяет поворачивать антенну вокруг ее продольной оси и фиксировать положение через 90° . Поворот рупорной антенны производится с помощью двух шнуров, прикрепленных к концам рычага 2, соединенного с фланцем детекторной секции. Продетектированный сигнал от приемной рупорной антенны (см. Приложение Г) через экранированный кабель 5 подается на милливольтметр ВЗ-38, который установлен рядом с исследуемой антенной.

По относительным показаниям милливольтметра ВЗ-38 снимаются диаграммы направленности антенны. Кроме того, милливольтметр ВЗ-38 может быть подключен к измерительной линии и использован для определения входного $K_{св}$ антенны.

Порядок выполнения эксперимента

В начале занятия каждой бригаде студентов необходимо с разрешения преподавателя или лаборанта включить приборы лабораторной установки для их предварительного прогрева перед началом эксперимента.

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

$$K_{св} = \sqrt{\frac{E_{\max}^2}{E_{\min}^2}}. \quad (12.6)$$

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. 12.3, 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 12.3. Экспериментальная зависимость входного $K_{св}$ антенны от угла поворота в азимутальной и угломестной плоскостях

| | | | | | | | | | |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|---|----|----|----|----|
| $\theta_{аз}$, 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. Снять диаграммы направленности антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Для снятия диаграммы направленности необходимо подключить ко входу милливольтметра ВЗ-38 кабель от приемной рупорной антенны, рупорную антенну повернуть в положение для приема горизонтально поляризованной волны (наибольшая сторона раскрыва рупора должна быть установлена вертикально).

Снимают диаграмму направленности антенны в горизонтальной плоскости. Для этого поворачивают зеркало в обе стороны на 10° и записывают в табл. 12.4 показания милливольтметра ВЗ-38 с шагом $0,5^\circ$.

Для снятия диаграммы направленности в вертикальной плоскости зеркало устанавливают «на нуль» по азимутальному лимбу. После этого, изменяя наклон зеркала в пределах от -15° (вверх) до $+5^\circ$ (вниз) путем вращения муфты, записывают показания прибора ВЗ-38 через 1° , занося данные в табл. 12.4. По полученным результатам после извлечения квадратного корня и нормирования строят в прямоугольной системе координат диаграммы направленности «по полю».

Таблица 12.4. Диаграмма направленности антенны в горизонтальной плоскости

| $\theta_{\text{аз}}$, град | -10 | -9,5 | -9 | ... | 0 | ... | 9 | 9,5 | 10 |
|------------------------------|-----|------|----|-----|---|-----|---|-----|----|
| $f_H^2(\theta)$ | | | | | | | | | |
| $f_H(\theta)$ | | | | | | | | | |
| $F_{H \text{ норм}}(\theta)$ | | | | | | | | | |

Таблица 12.5. Диаграмма направленности антенны в вертикальной плоскости

| $\theta_{\text{ум}}$, град | -15 | -14 | -13 | ... | 0 | ... | 3 | 4 | 5 |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|---|-----|---|---|---|
| $f_E^2(\theta)$ | | | | | | | | | |
| $f_E(\theta)$ | | | | | | | | | |
| $F_{E \text{ норм}}(\theta)$ | | | | | | | | | |

Диаграмма направленности в горизонтальной плоскости строится на том же рисунке, что и теоретическая, причем положения главных максимумов обеих диаграмм должны совпадать. Определяют ширину всех построенных диаграмм направленности по уровню 0,7, сравнивают ширину теоретической и экспериментальной диаграмм направленности.

3. Определить величину поля паразитной поляризации.

Величину поля паразитной поляризации определяют по отношению к величине поля основной поляризации в направлении главного максимума. Для этого устанавливают зеркало в горизонтальной и вертикальной плоскостях в положение, соответствующее максимальному отклонению 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. Относительную величину поля паразитной поляризации в процентах вычисляют по соотношению

$$N = \sqrt{\frac{P_{\text{пар}}}{P_{\text{осн}}}} \cdot 100\%, \quad (12.7)$$

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 установки;
- 2) таблицы с расчетными и экспериментальными данными для построения диаграмм направленности исследуемой антенны; формулы для расчета теоретических данных;

- 3) расчетные данные по КНД и ширине луча исследуемой антенны;
- 4) рисунки со следующими графиками: два графика $K_{св}$ в зависимости от углов поворота зеркала, графики расчетной и экспериментальной диаграмм направленности, график косекансной диаграммы направленности, график реального амплитудного распределения в раскрыве антенны вместе с аппроксимирующими кривыми;
- 5) данные по относительной величине поля паразитной поляризации;
- 6) выводы по каждому пункту работы и по всей работе в целом.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы параболической антенны.
2. Перечислите основные типы облучателей зеркальных антенн и поясните их устройство.
3. Как влияет характер распределения амплитуды 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. Перечислите основные способы формирования косекансной диаграммы направленности.
8. Нарисуйте косекансную диаграмму направленности в полярной и декартовой системах координат.
9. Почему в РЛС применяются антенны с косекансной диаграммой направленности?
10. Почему у параболической антенны возникает поле с паразитной поляризацией?
11. Поясните, почему поле зеркальной антенны с щелевым облучателем (вертикальное расположение щелей) имеет горизонтальную поляризацию.
12. Нарисуйте и поясните электрическую схему исследуемого антенно-фидерного устройства.

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.

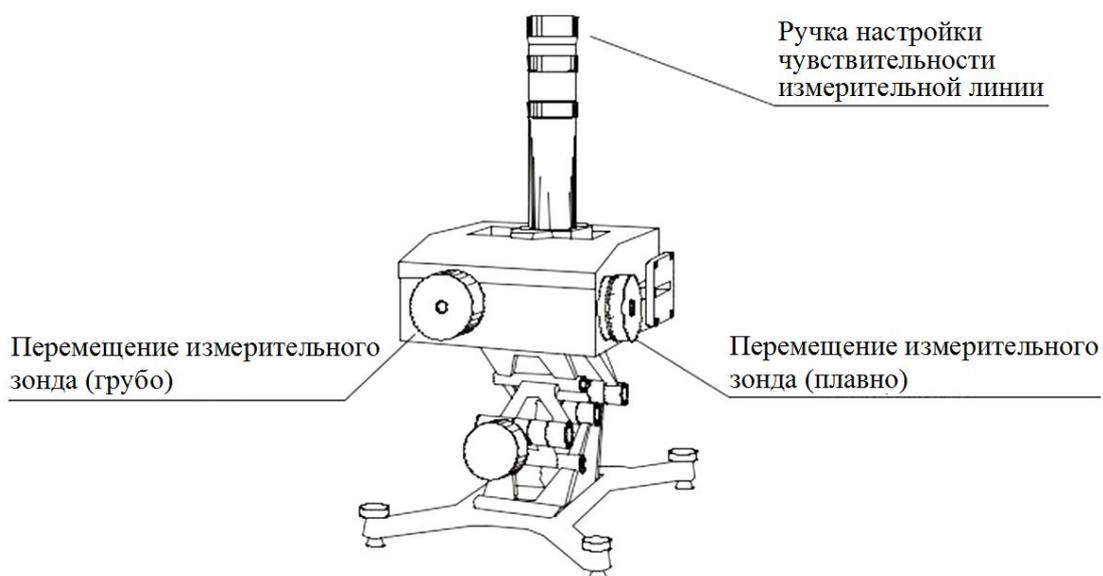


Рис. А.1. Внешний вид измерительной линии

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.

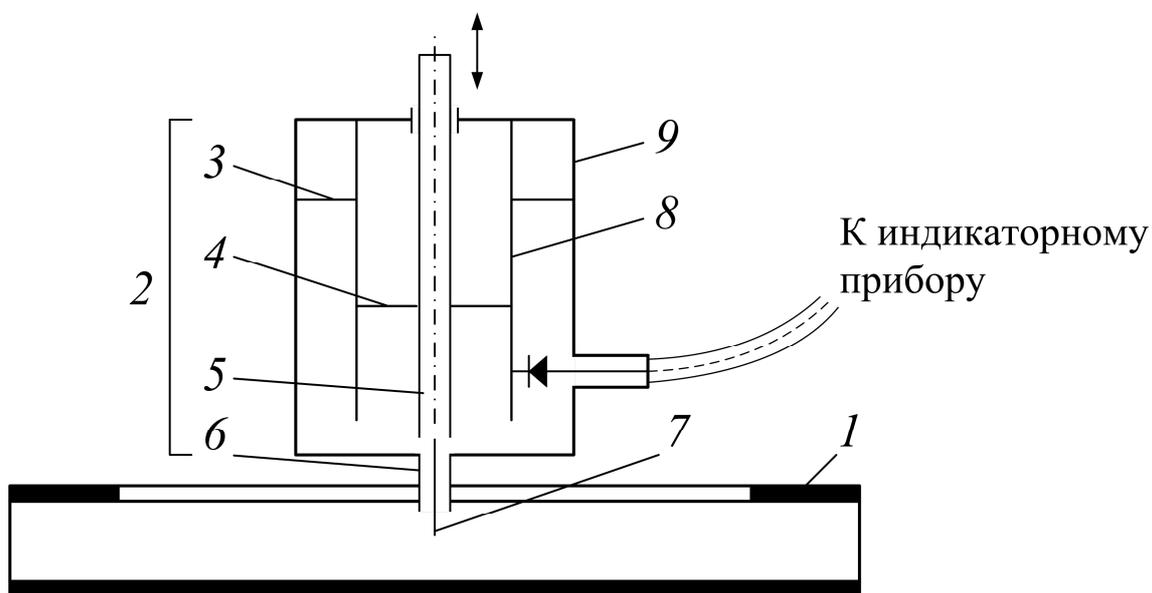


Рис. А.2. Схема устройства измерительной линии:

- 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

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

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

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

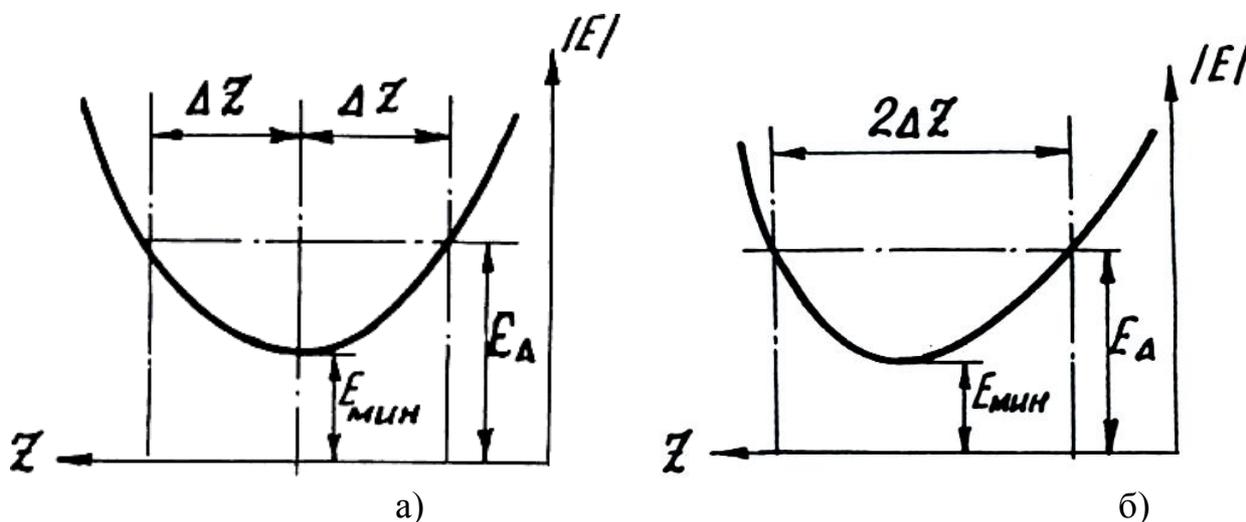


Рис. А.3. Форма кривой напряженности поля в области минимума:
 а – для идеальной измерительной линии; б – для реальной измерительной линии

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.

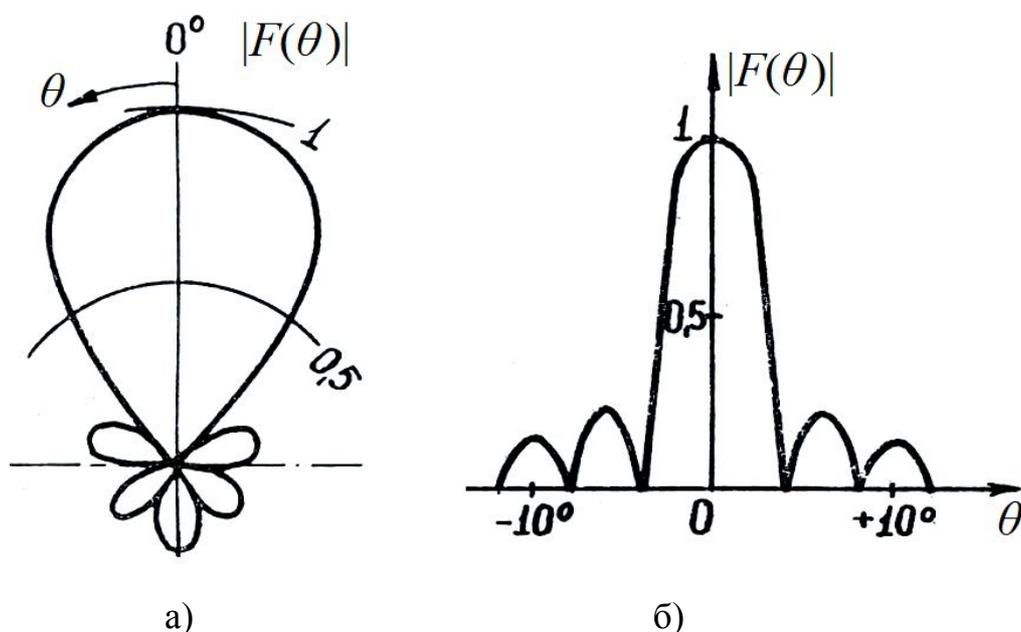


Рис. Б.1. Амплитудные диаграммы направленности:

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.

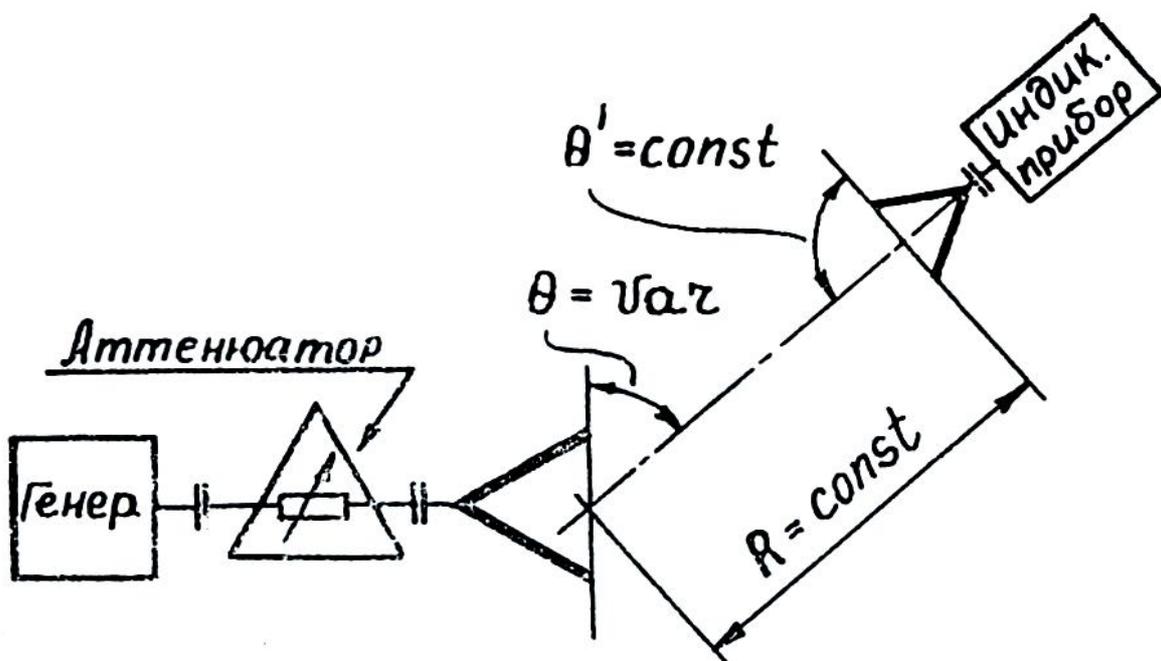


Рис. Б.2. Схема установки для снятия диаграммы направленности

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

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

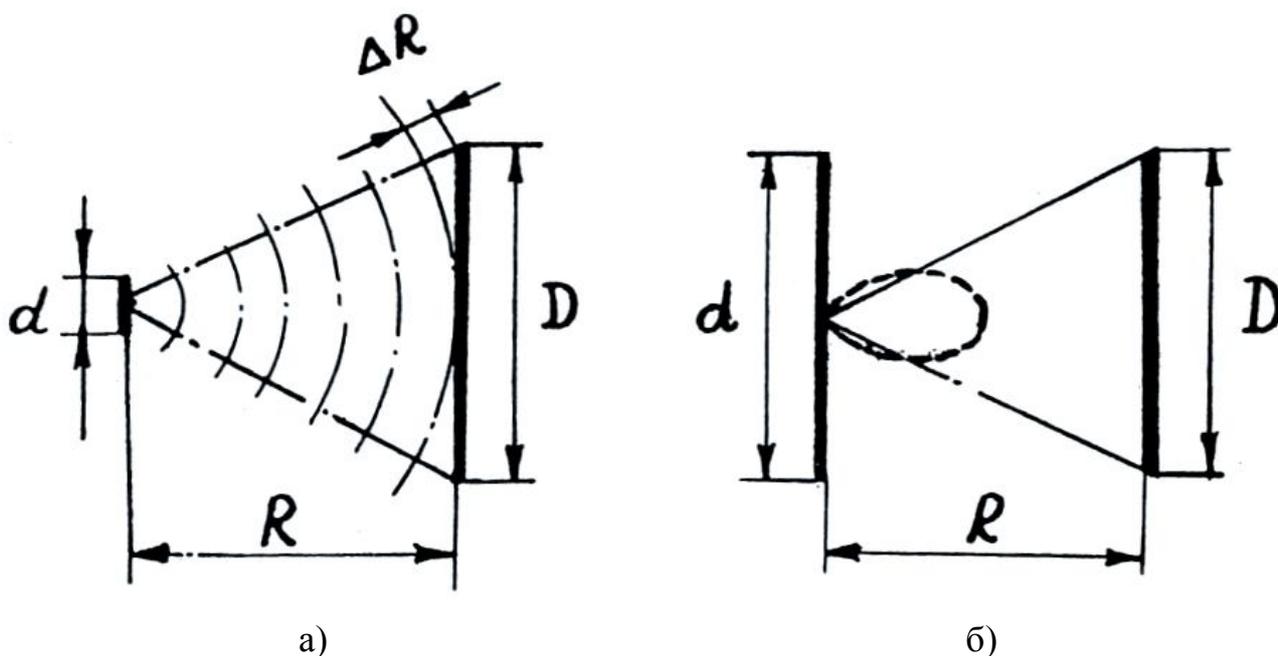


Рис. Б.3. Схема для определения расстояния между антеннами при измерении диаграммы направленности: *а* – с учетом только фазовой ошибки; *б* – с учетом только амплитудной ошибки

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.

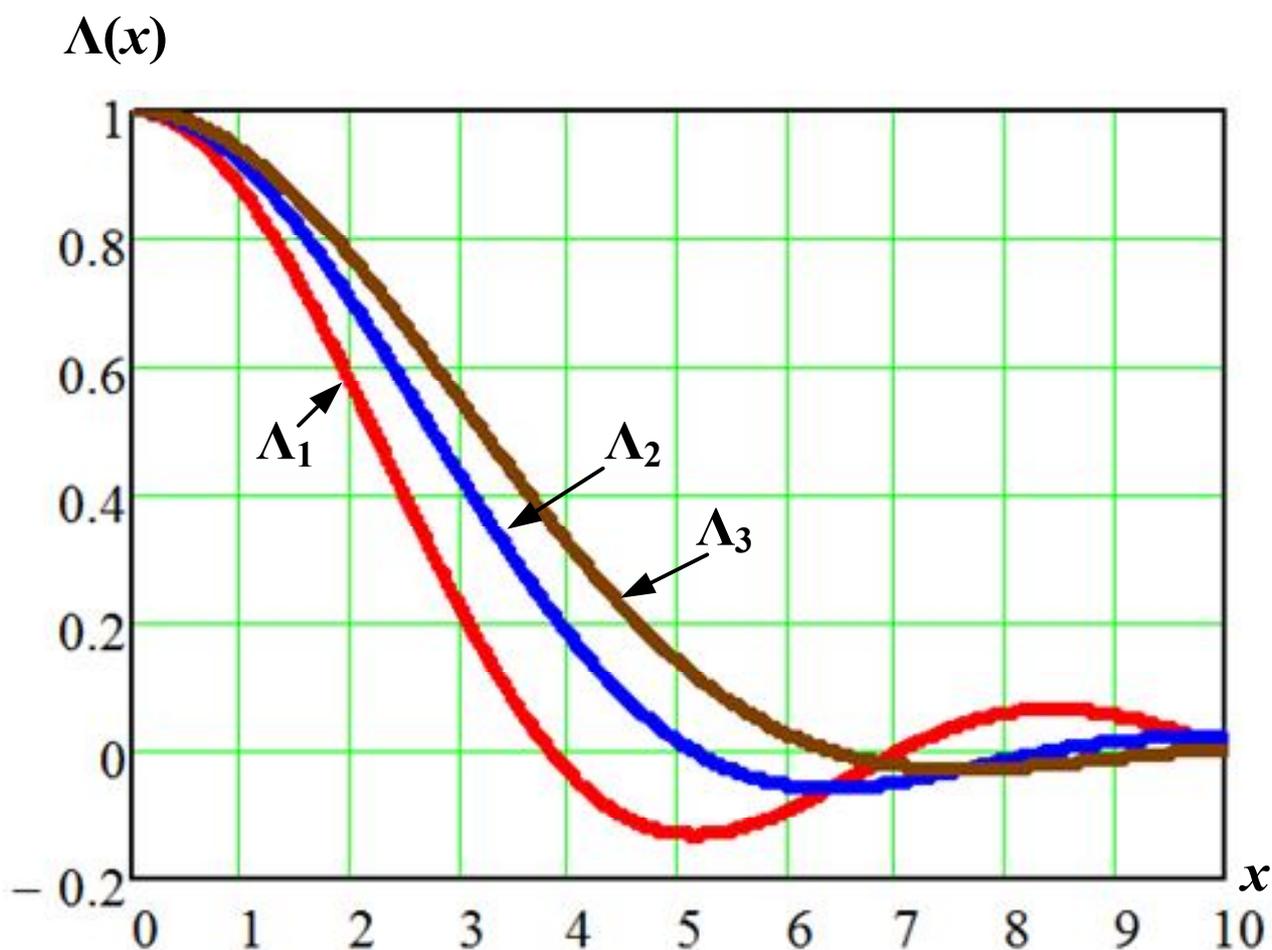


Рис. В.1. Λ -функция 1-го, 2-го и 3-го порядков

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).

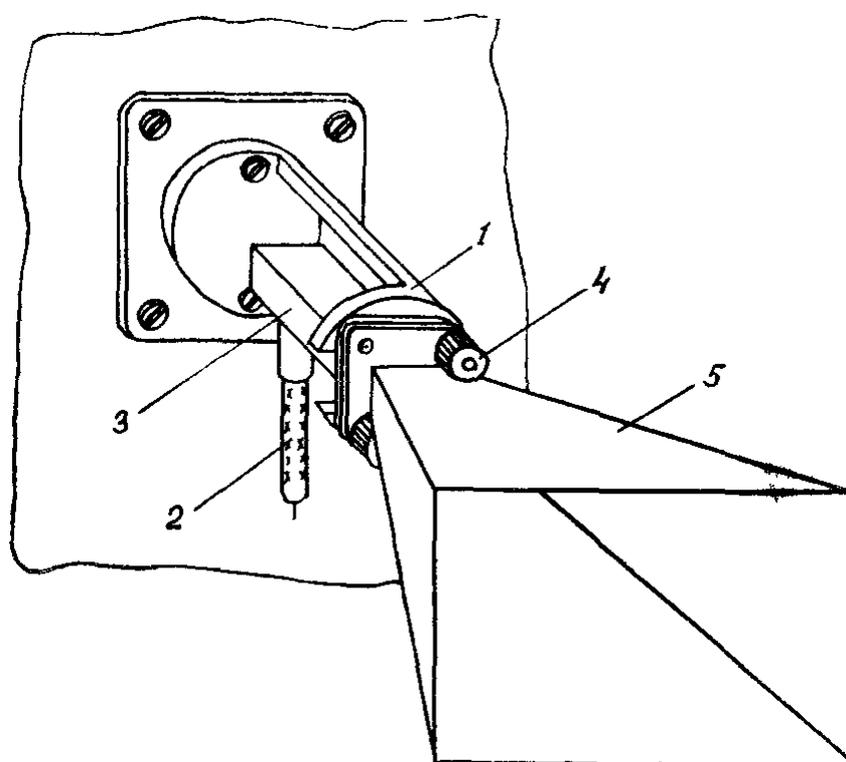


Рис. Г.1. Первый вариант вспомогательной передающей рупорной антенны:

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.

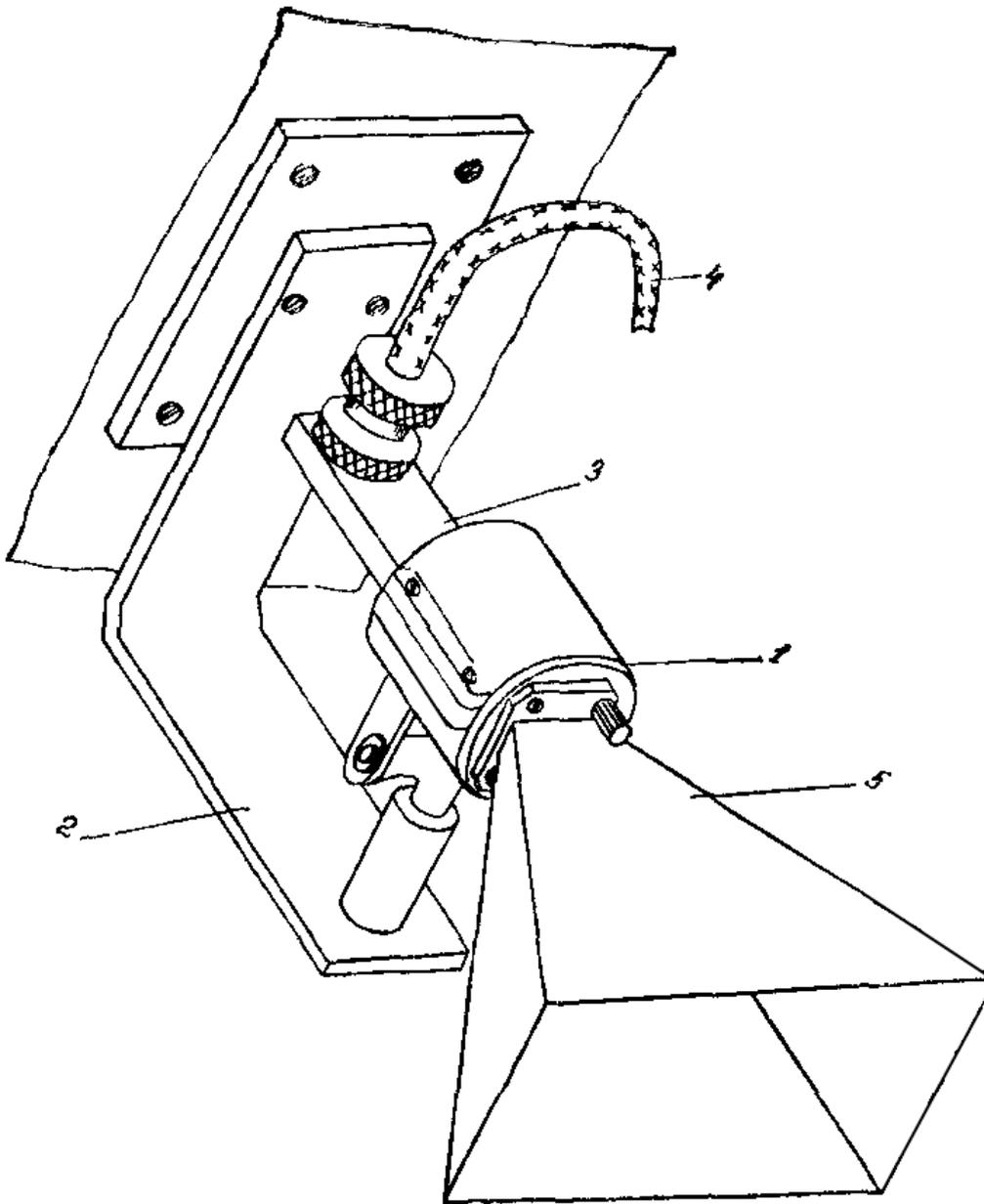


Рис. Г.2. Второй вариант вспомогательной передающей рупорной антенны:
1 – головка с вращающейся втулкой; 2 – кронштейн, укрепленный на стене;
3 – волноводный выход гибкого коаксиального кабеля; 4 – гибкий коаксиальный кабель; 5 – пирамидальный рупор

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 | 2 |
| Экспериментальная часть | 5 |
| Описание лабораторной установки | 5 |
| Порядок выполнения эксперимента | 8 |
| Требования к отчету | 11 |
| Контрольные вопросы | 12 |
| Приложение А. Описание измерительной линии | 13 |
| Приложение Б. Определение характеристик направленности антенны | 19 |
| Снятие диаграммы направленности | 19 |
| Измерение коэффициента усиления антенн..... | 23 |
| Измерение при помощи милливольтметра ВЗ-38 | 24 |
| Приложение В. Свойства и значения Λ-функции | 27 |
| Приложение Г. Вспомогательная рупорная антенна | 28 |

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., Зусенко 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.