

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого»

Кафедра «Радиосистемы»

УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ

Методические указания к лабораторным работам
для специальности 210302.65 «Радиотехника»

Великий Новгород
2011

Устройства СВЧ и антенны: Методические указания к лабораторным работам, переработанное издание / Сост. Е.В. Петров; НовГУ, Великий Новгород, 2011, 38 с.

Методические указания содержат 4 лабораторные работы по курсу «Устройства СВЧ и антенны» и предназначены для специальности 210302.65 - «Радиотехника».

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа №1. Исследование симметричного вибратора с рефлектором или директором	5
Лабораторная работа №2. Исследование волноводного излучателя и рупорной антенны	13
Лабораторная работа №3. Исследование волноводно-щелевой антенны	23
Лабораторная работа №4. Исследование диэлектрической и спиральной антенн	31
Требования к технике безопасности при работе с экспериментальными установками	37
Список литературы	37

ВВЕДЕНИЕ

Под антеннами подразумевается широкий класс устройств СВЧ, предназначенных для излучения или приема электромагнитных волн. Антенна является одним из важнейших элементов систем радиосвязи, радиовещания, телевидения, радиоуправления, радиорелейной связи, радиолокации, радиоастрономии, радионавигации и др.

В данном учебном пособии сделана попытка более или менее равномерно охватить в относительно небольшом числе лабораторных работ основные типы антенн: вибраторные, апертурные, антенны поверхностных волн, решетки излучателей. Описание каждой лабораторной работы построено по одинаковой схеме: определяется цель работы, даются краткие теоретические сведения по принципу действия и характеристикам исследуемой антенны, описывается методика экспериментального исследования, формулируется задание и порядок выполнения работы, требования к оформлению отчета и контрольные вопросы.

Основной целью лабораторных работ является закрепление теоретических сведений по антеннам СВЧ, получаемых студентами направления 552500 (210302.65) - «Радиотехника» в лекционном курсе «Устройства СВЧ и антенны», а также приобретение ими навыков работы с измерительной техникой СВЧ.

Перед изучением лабораторного цикла каждый студент обязан сдать минимум по технике безопасности, который должен включать правила работы с электротехнической аппаратурой и специфические вопросы, касающиеся высокочастотных приборов и трактов СВЧ в целом.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ СИММЕТРИЧНОГО ВИБРАТОРА
С РЕФЛЕКТОРОМ И ДИРЕКТОРОМ

Цель работы: исследование диаграммы направленности системы из активного полуволнового вибратора и пассивного вибратора, который в зависимости от настройки является или директором или рефлектором.

Общие положения

Как известно, полуволновой симметричный вибратор представляет собой слабонаправленный излучатель с коэффициентом направленного действия $D=1,64$. для увеличения направленного действия антенны широко применяются системы связанных вибраторов. Простейшим примером такой системы может служить изображенная на рисунке 1 система из двух активных вибраторов длиной полволны каждый ($2l=\lambda/2$), расположенных параллельно и разнесенных на расстояние в четверть длины волны ($d=\lambda/4$).

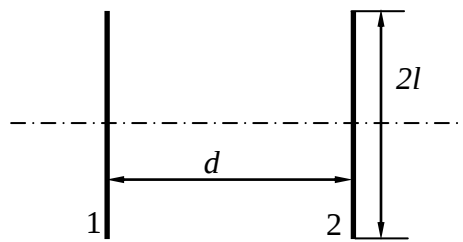


Рисунок 1

Диаграмму направленности такой системы вибраторов можно найти, используя теорему перемножения диаграмм направленности:

$$F(\varphi, \theta) = F_1(\varphi, \theta) \cdot F_n(\theta) \quad (1)$$

где $F_1(\varphi, \theta)$ - функция направленности отдельного полуволнового вибратора определяется выражением:

$$F_1(\varphi, \theta) = \cos(\pi/2 \cdot \sin \theta) / \cos \theta \quad (2)$$

и имеет вид, представленный на рисунке 2;

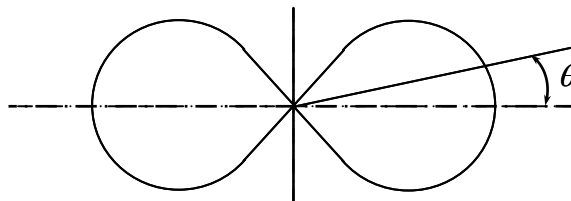


Рисунок 2

$F_n(\theta)$ - множитель системы излучателей, который при равных амплитудах токов в вибраторах определяется выражением:

$$F_n(\theta) = \left| \cos \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} \cos \theta - \Psi \right) \right] \right|, \quad (3)$$

здесь Ψ - фазовый сдвиг тока вибратора 2 по отношению к току вибратора 1.

Рассмотрим два часто встречающихся случая, когда $\Psi = \pi/2$ и когда $\Psi = -\pi/2$:

а) $\Psi = \pi/2$ - ток во втором вибраторе опережает по фазе ток в первом вибраторе на $\pi/2$. В этом случае множитель системы равен

$$F_n(\theta) = \left| \cos \left[\frac{\pi}{4} (1 - \cos \theta) \right] \right| \quad (4)$$

и имеет вид, представленный на рисунке 3.

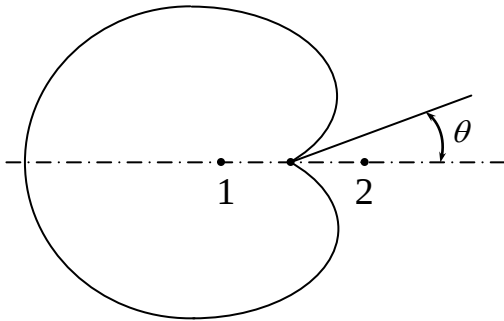


Рисунок 3

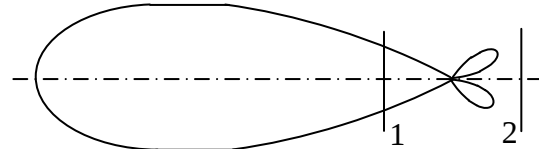


Рисунок 4

На рисунке 4 представлена суммарная диаграмма направленности всей системы с учетом (1). Такая диаграмма характерна для так называемой антенны с рефлектором. Волны, излучаемые вибратором 1, как бы отражаются от вибратора 2 (рефлектора);

б) $\Psi = -\pi/2$ - ток во втором вибраторе отстает по фазе от тока в первом вибраторе на $\pi/2$. В этом случае

$$F_n(\theta) = \left| \cos \left[\frac{\pi}{4} (1 + \cos \theta) \right] \right|. \quad (5)$$

На рисунках 5 и 6 представлены, соответственно, вид множителя системы и диаграмма направленности всей системы.

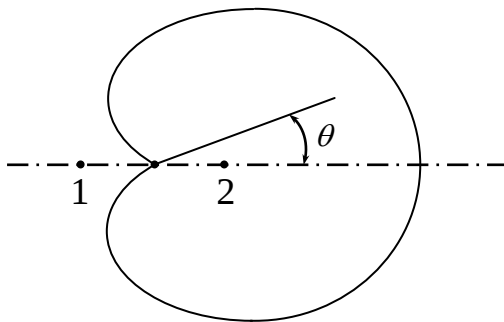


Рисунок 5

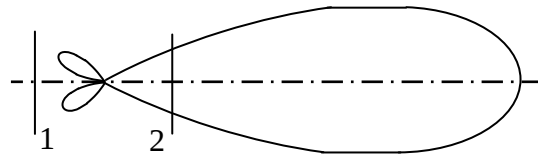


Рисунок 6

Данная система имеет название антенны с директором. Волны, излучаемые вибратором 1, как бы направляются вибратором 2 (директором). Необходимый сдвиг фаз между токами в вибраторах получают с помощью соответствующей схемы питания или настройки. При практическом использовании систем вибраторов очень часто активным вибратором, питаемым от генератора, является только один, например, вибратор 1, а другой является пассивным вибратором.

В данной лабораторной работе исследуется именно такая система излучателей, состоящая из активного и пассивного вибраторов. Поскольку в этом случае ток в пассивном вибраторе (вибраторе 2) наводится полем излучения активного вибратора (вибратора 1), соотношение между амплитудами и фазами токов в вибраторах зависят от длины вибраторов и расстояния между ними.

Эти соотношения, необходимые для определения диаграммы направленности системы, можно найти методом наведенных ЭДС [1].

Для этого необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{aligned} U_1 &= I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12} \\ 0 &= I_1 Z_{12} + I_2 Z_{22} \end{aligned} \quad (6)$$

где U_1 – напряжение от источника в зажимах вибратора 1;

I_1, I_2 – токи на зажимах 1-го и 2-го вибраторов;

Z_{11} – собственное сопротивление вибратора 1.

Полагая вибратор 1 полуволновым, настроенным в резонанс, можем считать $Z_{11} = R_{11} + jX_{11} \cong R_{11} = 73.1 \text{ (Ом)}$;

Z_{22} – собственное сопротивление вибратора 2. Ввиду того, что длина вибратора 2 ($2l_2$) близка к половине длины волны,

$$Z_{22} = R_{22} + jX_{22} = 73.1 + j \cdot \left(42.5 - \rho_2 \cdot \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{\lambda} l_2 \right) \quad (7)$$

где ρ_2 – волновое сопротивление вибратора 2;

$$\rho_2 = 120 \left(\ln \frac{2l_2}{r_2} - 1 \right), \quad (8)$$

r_2 – радиус проводника вибратора 1 ($r_2 = 2,5 \text{ мм}$);

$Z_{12} = R_{12} + jX_{12}$ – полное взаимное сопротивление между вибраторами 1 и 2, отнесенное к току в пучности.

Значения R_{12} и X_{12} для параллельно расположенных полуволновых вибраторов, концы которых находятся на одном уровне, зависят от расстояния d/λ и могут быть определены по графикам рисунков 7 и 8.

Из второго уравнения системы (6) следует, что

$$\frac{I_2}{I_1} = -\frac{Z_{12}}{Z_{22}} = m e^{j\psi}, \quad (9)$$

где m – модуль отношения токов:

$$m = \left| \frac{I_2}{I_1} \right| = \sqrt{\frac{R_{12}^2 + X_{12}^2}{R_{22}^2 + X_{22}^2}}; \quad (10)$$

Ψ - фазовый угол тока пассивного вибратора:

$$\Psi = \pi + \operatorname{arctg} \frac{X_{12}}{R_{12}} - \operatorname{arctg} \frac{X_{22}}{R_{22}}. \quad (11)$$

Изменением реактивного сопротивления X_{22} можно менять фазовый угол Ψ , а также модуль m .

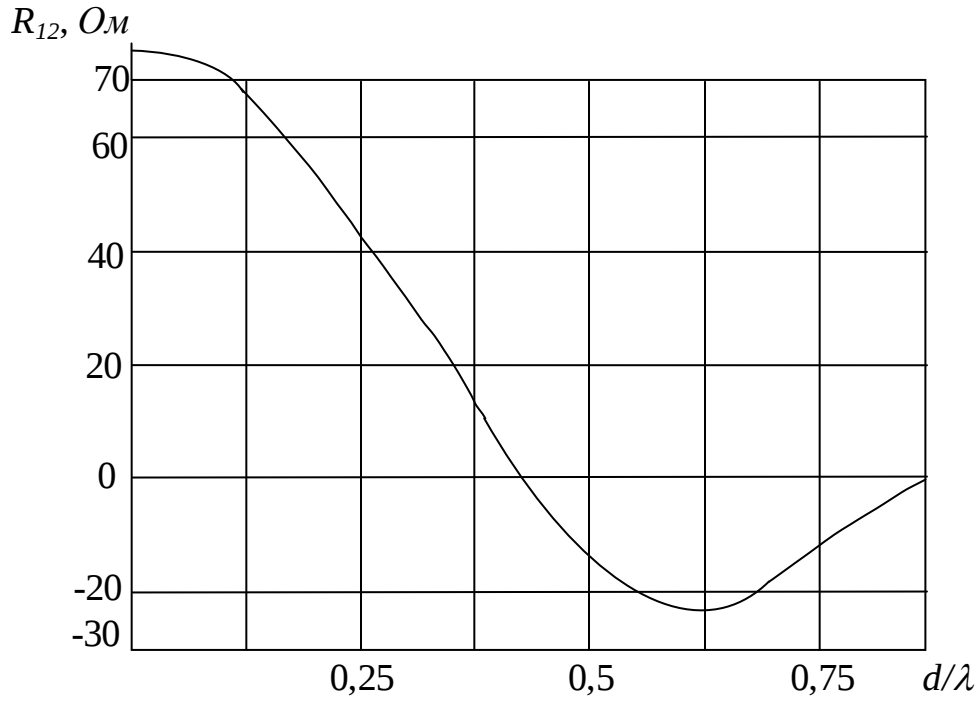


Рисунок 7

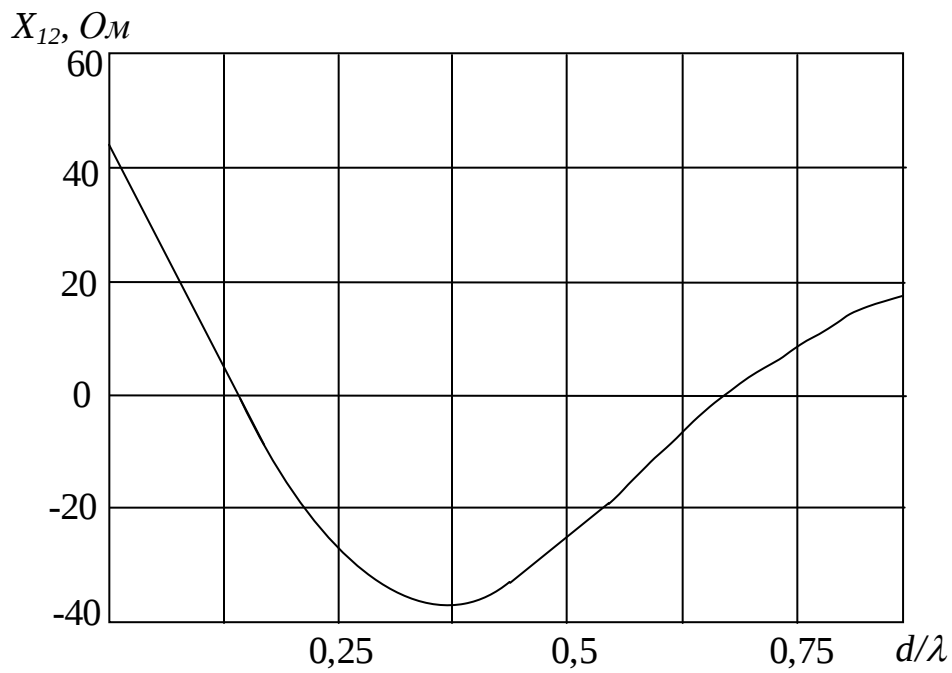


Рисунок 8

Получение направленного излучения с помощью системы из двух вибраторов объясняется интерференцией полей, создаваемых этими вибраторами. Рассмотрим диаграмму направленности этой системы в плоскости, в которой лежат вибраторы. Поле в точке приема, находящейся на большом расстоянии от антенны:

$$E(\theta) = B \frac{I_1}{r_1} e^{-jk r_1} \cdot F_1(\theta) + B \frac{I_2}{r_2} \cdot F_1(\theta) \cdot e^{-jk(r_1 - d \cdot \cos \theta)}, \quad (12)$$

где B – постоянный коэффициент,

I_1, I_2 – комплексные амплитуды токов,

r_1, r_2 – расстояние от центров вибраторов до точки наблюдения. Эти расстояния отличаются на малую величину $d \cdot \cos \theta$ и этой добавкой мы можем пренебречь в знаменателе выражения (12),

$F_1(\theta)$ – диаграмма направленности одиночного вибратора. Для $2l = \lambda/2$ (полуволнового вибратора)

$$F_1(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right)}{\cos \theta}.$$

Преобразуем выражение (12)

$$E(\theta) = B F_1(\theta) \frac{I_1}{r_1} e^{-jk r_1} \cdot (1 + m e^{j(kd \cos \theta + \Psi)}). \quad (13)$$

Модуль выражения (13) определяет собой диаграмму направленности системы из двух вибраторов:

$$f(\varphi, \theta) = F_1(\theta) \cdot f_2(\theta), \quad (14)$$

где $f_2(\theta) = \sqrt{1 + m^2 + 2m \cos(kd \cos \theta + \Psi)}$.

Направление максимального излучения находится из решения уравнения

$$kd \cos \theta + \Psi = 0. \quad (15)$$

Это направление зависит от расстояния между вибраторами и настройки пассивного вибратора. При расстоянии между вибраторами порядка $0,1 + 0,25\lambda$ и индуктивном характере сопротивления пассивного вибратора он действует как рефлектор, т.е. создает преимущественное излучение в направлении от пассивного вибратора к активному. При тех же расстояниях между вибраторами, но емкостном характере сопротивления пассивного вибратора, он действует как директор, т.е. создает преимущественное излучение в направлении от активного вибратора к пассивному.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из передающей антенны, питаемой от высокочастотного генератора и из исследуемой в режиме приема системы вибраторов. Исследуемая антенна укреплена на колонке и снабжена поворотным механизмом с отсчетной шкалой. В центре активного вибратора включен кристаллический детектор, сигнал с которого регистрируется прибором ВЗ-38. Так как уровень сигнала в детекторе мал, ток через детектор пропорционален квадрату напряжения.

Для получения правильных результатов при снятии диаграммы направленности должен быть выполнен ряд условий:

1) Распределение фаз напряженности поля вдоль антенны от сравнительно близко расположенного источника не должно заметно отличаться от распределения фаз напряженности поля от бесконечно удаленного источника. Это условие приводит к требованию

$$r_{min} \geq 16 \cdot l^2 / \lambda,$$

где l - половина длины вибратора;

r_{min} - минимально допустимое расстояние до источника.

В нашем случае $l/\lambda = 1/4$, $r_{min} \geq \lambda$.

2) Измерения должны проводиться в волновой зоне.

3) Угол, под которым видна передающая антенна из центра исследуемой антенны, должен быть мал по сравнению с шириной главного лепестка диаграммы направленности.

Если принять, что ослабление за счет направленности не должно превосходить 0,04 в крайней точке антенны, то приходим к условию:

$$r_{min} \geq 7l.$$

4) Антенна должна быть расположена вдали от стен и отражающих предметов.

Условия 1 и 3 выполняются в рассматриваемой установке в достаточной мере, условие 4 не может быть выполнено в комнате относительно небольшого размера. Однако влияние отраженных лучей в значительной мере устраняется тем, что при снятии диаграммы направленности исследуемая антенна не перемещается, а лишь вращается.

При работе следует иметь ввиду, что положение наблюдателя влияет на распределение поля у волны. Ввиду этого измерения следует проводить сидя при постоянном положении наблюдателя. После выполнения каких-либо регулировок, следует убрать руки, занять прежнее положение и лишь после этого производить отсчет.

Содержание работы

- 1) Включить генератор и индикаторный прибор.
- 2) Установить длину волны генератора равную резонансной длине волны передающей антенны (шлейф-вибратора Пистолькорса)

$$\lambda \approx 2 \cdot l_{ш}$$

где $l_{ш}$ - длина шлейф-вибратора, равная 40 см.

- 3) Установить длину активного вибратора приемной антенны равную половине длины волны генератора, т.е. 40 см.

4) Повернуть пассивный вибратор приемной антенны перпендикулярно активному, чтобы он не влиял на диаграмму направленности активного вибратора и снять диаграмму направленности одиночного полуволнового активного вибратора ($F_1(\theta)$).

Для определения $F_1(\theta)$ снять зависимость показаний индикаторного прибора α от угла поворота приемной антенны θ . Учитывая квадратичную характеристику детектора, функцию направленности $f_1(\theta)$ определить по формуле:

$$f_1(\theta) = \sqrt{d(\theta)}.$$

Нормированную функцию направленности определить так:

$$F_1(\theta) = f_1(\theta) / f_1(\theta)_{max}$$

- 5) Повернуть пассивный вибратор приемной антенны параллельно активному.

6) При четырех различных расстояниях между вибраторами ($d=0, 1 \div 0, 25\lambda$) изменяя длину пассивного вибратора ($2l_2$) снять зависимость тока в детекторе при пассивном вибраторе повернутом к передающей антенне ($I(0^\circ)$) и повернутом в противоположную сторону ($I(180^\circ)$).

7) По данным пункта 6 определить зависимость $I(0^\circ)/I(180^\circ)=f(d, l_2)$ и выбрать оптимальные d и l_2 для режима директора - ($I(0^\circ)/I(180^\circ)-max$) и для режима рефлектора - ($I(0^\circ)/I(180^\circ)-min$).

8) Экспериментально снять диаграммы направленности в режиме директора и в режиме рефлектора при настройке, определяемой пунктом 7.

9) Произвести теоретический расчет диаграммы направленности антенны в режиме директора и в режиме рефлектора для оптимальных значений d и $2l_2$ (пункт 6). Расчет произвести в соответствии с формулами (2), (10), (11), (14).

10) Построить экспериментально снятые и теоретически рассчитанные диаграммы направленности в полярной системе координат.

Содержание отчета

- 1) Основные расчетные соотношения.
- 2) Таблицы данных эксперимента.
- 3) Результаты расчеты.
- 4) Экспериментальные и расчетные диаграммы направленности одиночного вибратора и двух вибраторов в режиме рефлектора и в режиме директора.
- 5) Краткие выводы по работе.

Вопросы для самопроверки

- 1) В чем заключается принцип работы пассивных вибраторов в режиме рефлектора и директора?
- 2) В чем заключается принцип работы директорной антенны?
- 3) Чем определяется и какой вид имеет диаграмма направленности директорной антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях?
- 4) От чего зависит характер сопротивления пассивного вибратора?
- 5) В чем отличие и преимущество шлейф-вибратора Пистолькорса от обычного полуволнового вибратора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ
И РУПОРНОЙ АНТЕННЫ**

Цель работы: определение частотной зависимости коэффициента усиления и согласования с питающим волноводом волноводного излучателя и рупорной антенны.

Общие положения

Открытый конец волновода представляет собой простейшую апертурную антенну СВЧ. Антенны такого типа являются слабонаправленными, так как в одномодовом режиме работы волновода размеры его поперечного сечения меньше длины волны. Другой особенностью волноводных излучателей является их относительно плохое согласование со свободным пространством вследствие резкого изменения условий распространения электромагнитной волны при переходе от волновода к свободному пространству. В силу указанных причин открытый конец волновода как излучатель находит ограниченное применение. Он может быть использован в качестве облучателя более сложных антенн или как элемент решетки излучателей. При прочих равных условиях предпочтение отдается открытому концу прямоугольного волновода, который и является объектом исследований в данной работе.

Для получения более острой диаграммы направленности и для улучшения согласования с питающим волноводом, сечение стандартного волновода можно плавно увеличивать, превращая волновод в рупор. Размеры поперечного сечения рупора могут значительно превышать длину волны и, как следствие, диаграмма направленности рупорных антенн оказывается уже, чем у излучателей в виде открытого конца волновода.

В зависимости от формы поперечного сечения рупора различают рупоры секториальные, пирамидальные и конические. Испытываемый в данной работе рупор является пирамидальным рупором. Однако теория рупорных антенн детально разработана только для секториальных рупоров. При этом возможно возбуждение рупора такое, что вектор напряженности электрического поля перпендикулярен длинным сторонам выходного отверстия. Такой рупор получается расширением стенок волновода в плоскости расположения магнитных линий и поэтому называется *H*-секториальным рупором. При другом возбуждении вектор напряженности электрического поля параллелен длинным сторонам выходного отверстия. Такой рупор называется *E*-секториальным. Пирамидальный рупор можно рассматривать как комбинацию *H*-секториального и *E*-секториального рупоров.

Прямой электродинамический расчет процесса распространения и излучения электромагнитных волн в рупорных антеннах очень громоздкий и, с другой стороны, достаточно детально описан в литературе [1]. Поэтому в данном описании отмечены основные особенности этого процесса,

определяющие направленные свойства рупоров.

В рупорах, как и в волноводах, возможно распространение волн типа E или H . В рупорах на основе прямоугольного волновода основной является волна типа H_{10} , структура которой аналогична структуре волны H_{10} в волноводе. Основное отличие этих волн заключается в том, что в секториальных рупорах фазовый фронт волны не плоский как в волноводах, а цилиндрический, что приводит к возникновению на раскрые рупора квадратичных фазовых искажений. Возникновение фазовых искажений поясняется рисунком 1.

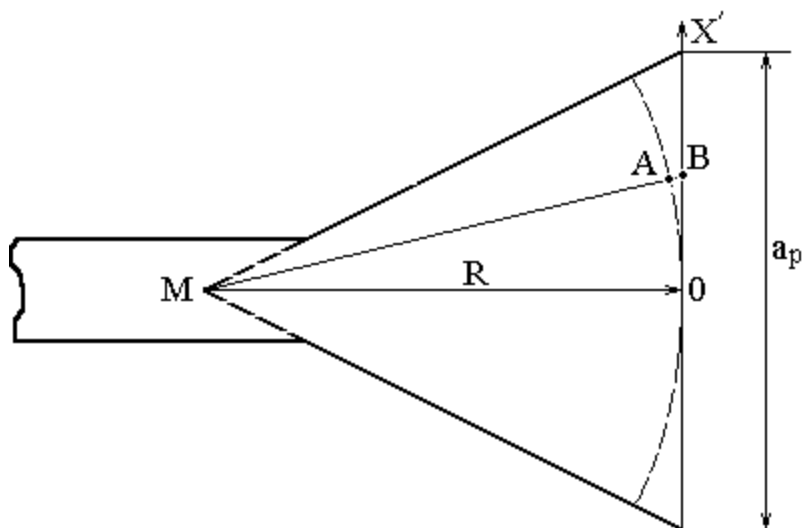


Рисунок 1.

Здесь R – длина рупора, a_p – размер раскрыва рупора, X' – координата, отсчитываемая от центра раскрыва. Фазовый фронт волны в рупоре показан штриховой линией.

Между точками O и B раскрыва будет существовать разность фаз $\Delta\Psi$, обусловленная разностью хода лучей MO и MB из вершины рупора:

$$\Delta\Psi \cong \frac{\pi(x')^2}{\lambda R}$$

На краю раскрыва фазовые искажения максимальны и равны

$$\Delta\Psi = \frac{\pi a_p^2}{4\lambda R}. \quad (1)$$

При достаточной длине рупорной антенны (при заданных размерах раскрыва) цилиндрическая поверхность фронта волн становится близкой к плоской, и колебания во всех точках выходного отверстия почти эквифазны. В правильно рассчитанном рупоре максимальное отклонение фазы напряженности поля в любой точке выходного отверстия от фазы напряженности поля в центре не должно превосходить $\pi/2$ в E -секториальном рупоре и величины $\frac{3\pi}{4}$ в H -секториальном рупоре.

Теория апертурных антенн позволяет с достаточной точностью определить основные параметры исследуемых антенн по их геометрическим размерам.

Коэффициент направленного действия – это число, показывающее, во сколько раз пришлось бы увеличить мощность излучения антенны при переходе от направленной антенны к ненаправленной при условии сохранения одинаковой напряженности поля в месте приема.

Коэффициент направленного действия апертурной антенны с плоской однородной волной в ее раскрыве (т.е. при условии, что напряженности поля в любой точке раскрыва равны между собой по амплитуде и фазе) определяется общей формулой [1]:

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

где S – площадь раскрыва антенны;

λ – рабочая длина волны.

Вследствие неоднородного распределения амплитуды и фазы поля на поверхности раскрыва, D реальной антенны меньше указанного выше и равен:

$$D = \frac{4\pi S_{эфф}}{\lambda^2}, \quad (3)$$

где $S_{эфф}$ – эффективная площадь раскрыва;

$$S_{эфф} = S \cdot \sigma, \quad (4)$$

где σ – коэффициент использования площади раскрыва.

Коэффициент использования площади раскрыва открытого конца прямоугольного волновода с волной H_{10} равен 0,81.

В рупорных антеннах коэффициент использования площади раскрыва имеет сложную зависимость от геометрических размеров. Коэффициент направленного действия "H"- секториальных и "E"- секториальных рупорных антенн может быть определен с помощью графиков (рисунок 2 и рисунок 3).

Максимальное значение D при заданной длине рупора на фиксированной частоте соответствует оптимальному рупору. Для оптимального "H"- секториального рупора $\Delta\Psi_{Hmax} = 3/4 \cdot \pi$, $\sigma_H = 0,64$, а для "E"- секториального рупора $\Delta\Psi_{Emax} = \pi/2$, $\sigma_E = 0,64$.

Коэффициент направленного действия пирамидального рупора может быть определен с помощью тех же графиков (рисунок 2 и рисунок 3) по формуле:

$$D_{руп} = \frac{\pi}{32} \left(D_H \frac{\lambda}{a_p} \right) \cdot \left(D_E \frac{\lambda}{a_p} \right). \quad (5)$$

Коэффициент усиления антенны (G) характеризует выигрыш, даваемый антенной при учете как ее направленного действия, так и потерь в ней.

$$G = D \cdot \eta, \quad (6)$$

где η – коэффициент полезного действия антенны.

Коэффициент полезного действия открытого конца волновода и рупорной антенны в первом приближении равен 1, откуда для этих антенн $G=D$.

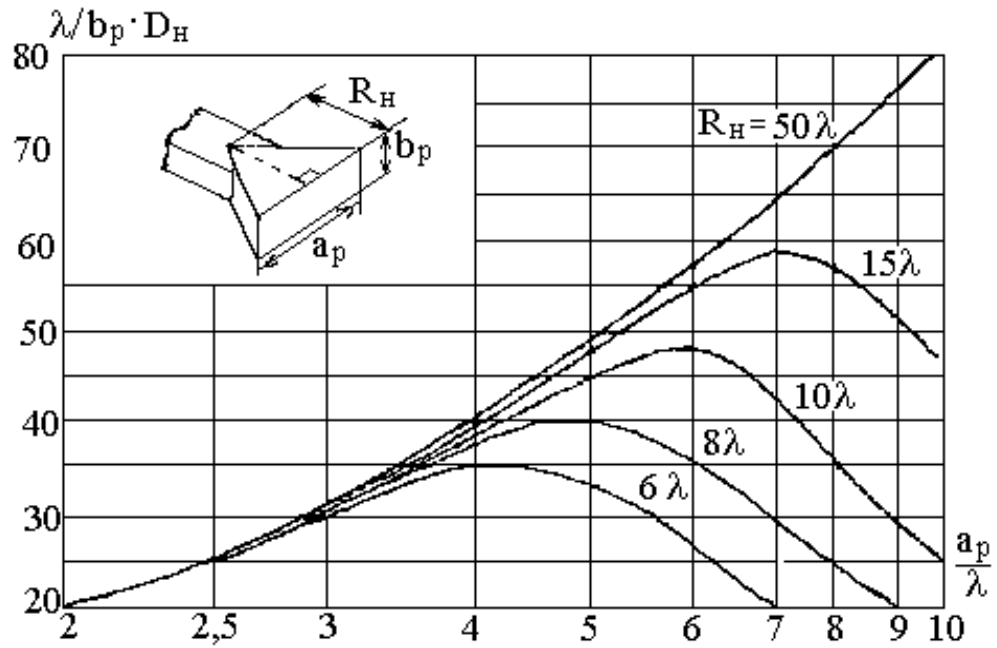


Рисунок 2

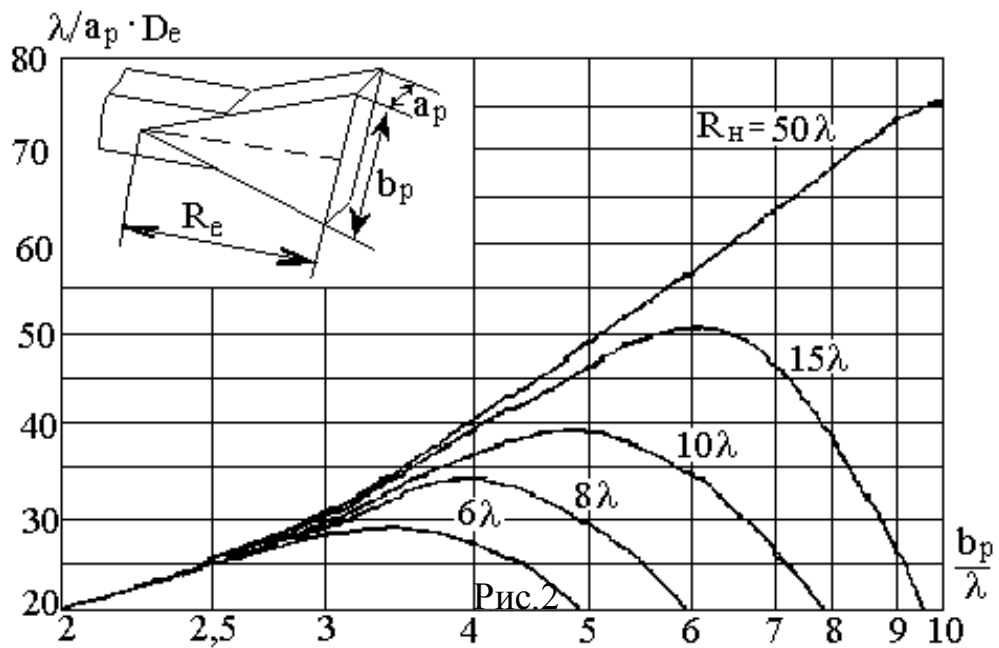


Рисунок 3

Степень согласования антенны с питающим волноводом характеризуется модулем коэффициента отражения от входа антенны Γ . Модуль коэффициента отражения от конца прямоугольного волновода (пирамидального рупора) с волной H_{10} приближенно может быть оценен с помощью выражения:

$$\Gamma = \frac{1 - \lambda/\lambda_g}{1 + \lambda/\lambda_g}, \quad (7)$$

где λ - длина волны генератора, λ_g - длина волны в волноводе (в рупоре).

Для открытого конца прямоугольного волновода с волной H_{10} :

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}. \quad (8)$$

Для пирамидального рупора с волной H_{10} :

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a_p)^2}}. \quad (9)$$

Методика экспериментального исследования

Как известно [1], коэффициент усиления антенны может быть определен как отношение плотности потока мощности (Π) данной антенны в направлении максимального излучения к плотности потока мощности Π_0 антенны, равномерно излучающей во всех направлениях и имеющей коэффициент полезного действия, равный единице, при условии равенства подводимых мощностей:

$$G = \Pi / \Pi_0. \quad (10)$$

Для экспериментального определения G существует несколько методов: метод сравнения с эталонной антенной, метод двух идентичных антенн, метод плоского экрана [2].

В данной работе используется способ измерения с помощью плоского экрана. Схема определения коэффициента усиления антенны с помощью отражающего экрана представлена на рисунке 4.

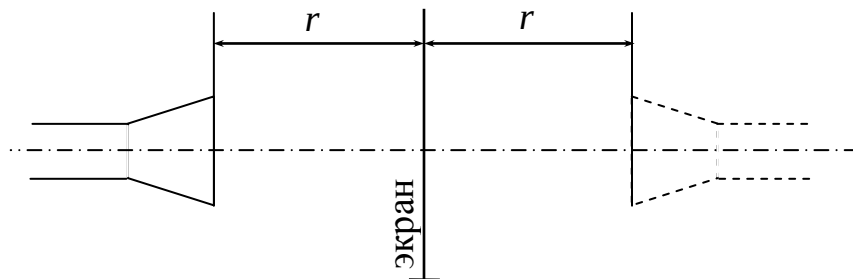


Рисунок 4

Энергия, излучаемая антенной и попадающая на металлический экран, отражается от него, и, попадая вновь на антенну, создает отраженную волну в линии, питающей антенну. Коэффициент отражения в питающей линии определяется с помощью рефлектометра и служит мерой коэффициента усиления.

Определим мощность P_0 , возвращающуюся в антенну в результате отражения. Для этого построим зеркальное отображение антенны и учтем, что мощность, которая попадала бы в зеркальное изображение (при отсутствии экрана), равна мощности, возвращающейся в антенну.

Если плотность потока мощности равна Π , то мощность, попадающая в антенну-изображение, будет:

$$P_0 = \Pi \cdot \eta \cdot S_{эфф}, \quad (11)$$

откуда

$$\Pi = P_0 / \eta \cdot S_{эфф}, \quad (12)$$

где $S_{эфф}$ – эффективная площадь антенны,

η - коэффициент полезного действия антенны.

Плотность потока мощности равномерно излучающей антенны вблизи изображения (на расстоянии $2r$) равна

$$\Pi_0 = \frac{P_A}{4\pi(2r)^2}. \quad (13)$$

Подставляя (12) и (13) в (10) получаем

$$G = \frac{4\pi P_0 (2r)^2}{\eta P_A S_{эфф}}. \quad (14)$$

Между эффективной площадью антенны и ее коэффициентом усиления существует зависимость [1]:

$$\eta S_{эфф} = \frac{G \lambda^2}{4\pi}.$$

Подставив последнее выражение в формулу (14), получим:

$$G = \frac{4\pi(2r)}{\lambda} \sqrt{\frac{P_0}{P_A}}.$$

Но отношение P_0/P_A представляет собой не что иное, как квадрат коэффициента отражения по напряжению $|\Gamma_{\mathcal{E}}|^2$ в питающей линии за счет отражений от экрана:

$$|\Gamma_{\mathcal{E}}| = \frac{P_0}{P_A}.$$

Окончательно получаем:

$$G = \frac{8\pi r}{\lambda} |\Gamma_{\mathcal{E}}|. \quad (15)$$

При неполном согласовании антенны с питающим волноводом, измеряемый коэффициент отражения в линии $\Gamma_{\mathcal{L}}$ определяется не только мощностью, отраженной от экрана, но и отражениями от входа антенны (Γ_A). Если мы будем перемещать антенну относительно экрана (менять расстояние r), фаза коэффициента отражения в линии, определяемая отражением от экрана, изменяется в соответствии с выражением:

$$\Gamma_{\mathcal{E}} = -|\Gamma_{\mathcal{E}}| e^{-jk(2r)}, \quad (16)$$

где k – постоянная распространения в свободном пространстве.

Знак (-) в правой части учитывает поворот фазы на 180° при отражении от экрана. Фаза коэффициента отражения от неоднородностей остается неизменной, в силу чего величина результирующего коэффициента отражения,

при перемещении экрана, изменяется.

Для количественной оценки этого явления рассмотрим эквивалентную линию (рисунок 5). Здесь соединение волновода и антенны представлено в виде идеального трансформатора с коэффициентом трансформации n , а свободное пространство представлено продолжением линии с некоторой нагрузкой на конце. При отсутствии экрана отражения отсутствуют, и сопротивление нагрузки должно быть принято равным волновому сопротивлению линии.

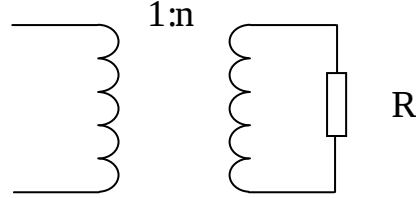


Рисунок 5

При наличии экрана имеет место отраженная волна, и сопротивление нагрузки должно быть таково, чтобы коэффициент отражения от нее был равен коэффициенту отражения от экрана (16):

$$R = Z_0 \frac{1 + \Gamma_{\text{э}}}{1 - \Gamma_{\text{э}}}, \quad (17)$$

где Z_0 – волновое сопротивление линии.

В первом случае (при отсутствии экрана) сопротивление на вторичных зажимах трансформатора равно Z_0 , а на первичных – Z_0/n .

Коэффициент отражения $\Gamma_{\text{л}}$ равен:

$$\Gamma_{\text{л}} = \frac{Z_0/n^2 - Z_0}{Z_0/n^2 + Z_0} = \frac{1 - n^2}{1 + n^2} = \Gamma_{\text{А}}, \quad (18)$$

где n – коэффициент трансформации.

Это и есть коэффициент отражения от входа антенны.

Во втором случае (при наличии экрана) сопротивление на первичных зажимах трансформатора равно R/n^2 , где R определяется (17). Коэффициент отражения в линии равен:

$$\Gamma_{\text{л}} = \frac{R/n^2 - Z_0}{R/n^2 + Z_0} = \frac{1 + \Gamma_{\text{э}} - n^2(1 - \Gamma_{\text{э}})}{1 + \Gamma_{\text{э}} + n^2(1 - \Gamma_{\text{э}})},$$

модуль результирующего коэффициента отражения с учетом (17) и (18) будет равен:

$$|\Gamma_{\text{л}}| = \sqrt{\frac{\Gamma_{\text{А}}^2 - 2|\Gamma_{\text{э}}||\Gamma_{\text{А}}|\cos 2kr + \Gamma_{\text{э}}^2}{1 - 2|\Gamma_{\text{э}}||\Gamma_{\text{А}}|\cos 2kr + \Gamma_{\text{э}}^2\Gamma_{\text{А}}^2}}. \quad (19)$$

Из (19) видно, что результирующий коэффициент отражения колеблется в довольно широких пределах, которые определяются степенью согласования антенны. Характерный вид зависимости $|\Gamma_{\text{л}}|$ от расстояния до экрана представлен на рисунке 6. Максимум $|\Gamma_{\text{л}}|$ приблизительно будет иметь место при

$$\cos 2kr = -1, \quad |\Gamma_{\text{л}}|_{\text{max}} \cong |\Gamma_{\text{э}}| + |\Gamma_{\text{А}}|. \quad (20)$$

Минимум $|\Gamma_L|$ приблизительно будет иметь место при

$$\cos 2kr = 1, \quad |\Gamma_L|_{\min} \cong |\Gamma_{\mathcal{E}}| - |\Gamma_A|. \quad (21)$$

Минимум и максимум коэффициента отражения получается при изменении расстояния до экрана на четверть длины волны.

Таким образом (рисунок 6), $|\Gamma_{\mathcal{E}}|$, необходимый для определения коэффициента усиления антенны по формуле (15), при $|\Gamma_{\mathcal{E}}| > |\Gamma_A|$ определяется как:

$$|\Gamma_{\mathcal{E}}| = \frac{|\Gamma_L|_{\max} + |\Gamma_L|_{\min}}{2}, \quad (22)$$

при этом соответствующее $|\Gamma_{\mathcal{E}}|$ расстояние до экрана определяется как

$$r = \frac{r_{\max} + r_{\min}}{2},$$

а $|\Gamma_A|$, определяющий степень согласования антенны с питающим волноводом будет равен

$$|\Gamma_A| = \frac{|\Gamma_L|_{\max} - |\Gamma_L|_{\min}}{2}. \quad (23)$$

Если $|\Gamma_A| > |\Gamma_{\mathcal{E}}|$, $|\Gamma_A|$ определяется по формуле (22), а $|\Gamma_{\mathcal{E}}|$ - по формуле (23).

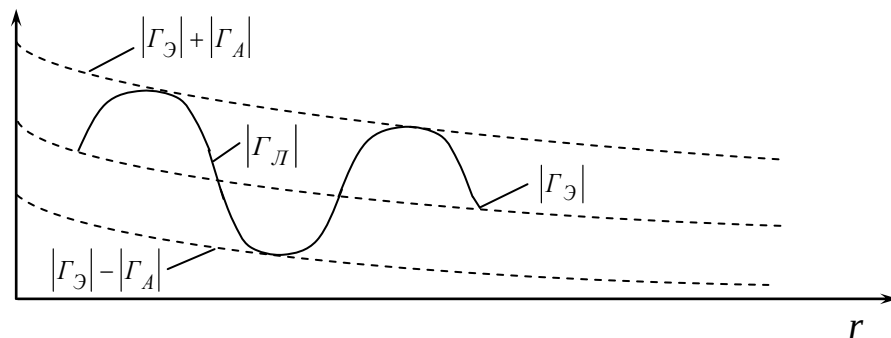


Рисунок 6

Внимание! При выполнении измерений должен выполняться ряд условий, обеспечивающих необходимую точность:

1) Антенна должна находиться в поле плоской волны и диаграмма направленности ее не должна существенно влиять на равномерность облучения при приеме, откуда [2]:

$$r \geq (0,83 \div 1,17) L^2 / \lambda, \quad (24)$$

где L – наибольший размер апертуры (раскрыва) антенны.

2) Размер экрана должен быть достаточно велик, чтобы на него попадала вся мощность, сосредоточенная в главном лепестке диаграммы направленности, для чего его размеры должны удовлетворять условию:

$$h > \frac{2r\lambda}{L}, \quad (25)$$

где h – размер экрана.

Описание экспериментальной установки

Блок-схема установки для исследования открытого конца волновода и рупорной антенны приведена на рисунке 7. В состав установки входит генератор, отражающий экран, рефлектометр с исследуемой антенной, индикаторный прибор.

Рефлектометр с антенной имеет механизм перемещения относительно экрана.

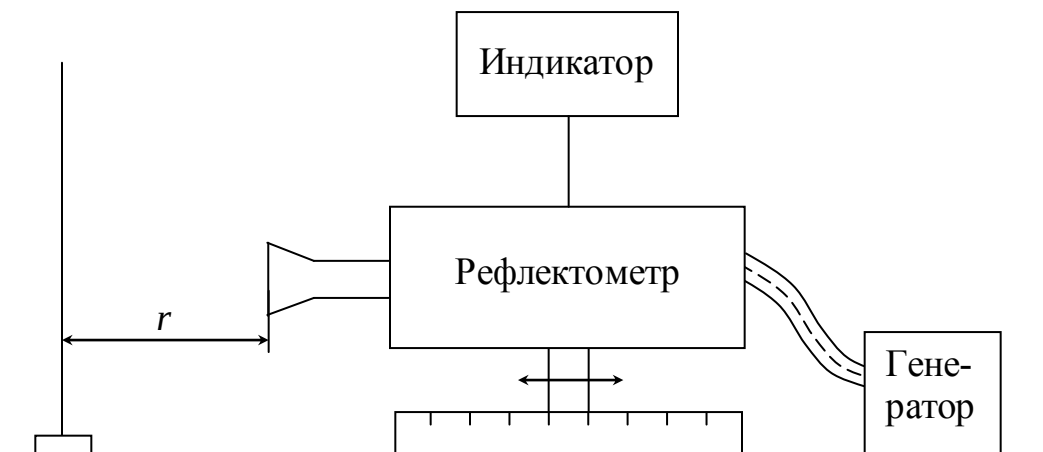


Рисунок 7

Рефлектометр служит для измерения уровня падающей и отраженной волны, и состоит из двухканального ответвителя, волноводного переключателя и детекторной секции.

При квадратичной характеристике детектора модуль коэффициента отражения в линии $|\Gamma_L|$ определяется как:

$$|\Gamma_L| = \sqrt{\alpha_{omp} / \alpha_{nad}}, \quad (26)$$

где α_{omp} — показания индикатора, когда волноводный переключатель находится в положении «отраженная»,

α_{nad} — показания индикатора, когда волноводный переключатель находится в положении «падающая».

Содержание работы

1) Измерить коэффициент усиления и коэффициент отражения от входа для открытого конца прямоугольного волновода и пирамидального рупора на трех частотах, указанных преподавателем.

2) Произвести теоретический расчет G и $|\Gamma_A|$ по геометрическим размерам на тех же самых частотах.

3) Оценить погрешность измерений в лабораторной установке.

Порядок выполнения работы

- 1) Ознакомиться с лабораторной установкой и конструкцией исследуемых антенн, определить геометрические размеры антенн, подключить одну из исследуемых антенн к рефлектометру.
- 2) Включить генератор и индикаторный прибор.
- 3) Установить рабочую частоту по заданию преподавателя.
- 4) Снять зависимость модуля коэффициента отражения в линии от расстояния до экрана. Измерения производить на протяжении одной длины волны через каждую $0,1$ длины волны.
- 5) Повторить измерения по п.4 для двух других частот.
- 6) Подключить к рефлектометру вторую исследуемую антенну и повторить измерения по пунктам 3, 4, 5.
- 7) По результатам измерений построить графики $|Γ_{л}|=f(r)$ и определить по ним $|Γ_{э}|$ и $|Γ_{А}|$.
- 8) Определить коэффициент усиления по формуле (15).
- 9) Произвести расчет G и $|Γ_{А}|$ по формулам (6), (7) к графикам (рисунок 2, рисунок 3).
- 10) Проверить выполнение условий (24), (25) в лабораторной установке.

Содержание отчета

- 1) Блок-схема установки.
- 2) Основные расчетные соотношения.
- 3) Экспериментальные и расчетные данные в виде таблиц и графиков.
- 4) Краткие выводы по работе.

Вопросы для самопроверки

- 1) Как зависят свойства апертурных антенн от размеров раскрыва и закона распределения амплитуды и фазы поля по раскрыву?
- 2) По какому закону меняется фаза поля по раскрыву рупора, и от каких его параметров она зависит?
- 3) Какие рупоры называют оптимальными?
- 4) Что такое коэффициент усиления антенны? От каких факторов он зависит?
- 5) В чем состоит сущность измерения коэффициента усиления антенны методом отражающего экрана?
- 6) От чего зависит согласование антенны с питающим волноводом?
- 7) Объяснить возможные погрешности измерений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫХ АНТЕНН

Цель работы: исследование направленных свойств системы, состоящей из дискретных излучателей, выполненных в виде наклонных щелей, прорезанных в узкой стенке прямоугольного волновода.

Общие положения

При распространении вдоль волновода электромагнитной волны на внутренних стенках его образуются поверхностные токи. Если в стенке волновода прорезана щель, пересекающая линии распространения поверхностных токов, то она возбуждается, так как поверхностный ток, текущий по стенкам волновода, частично огибает щель и частично продолжает течь в прежнем направлении через нее в виде тока смещения, соответствующего электрическому полю между краями щели. Распределение поля вдоль щели близко к синусоидальному.

Наиболее часто для созданий волноводно-щелевых антенн (ВЩА) используются прямоугольные волноводы с волной основного типа H_{10} . Картина силовых линий поверхностного тока волны H_{10} на внутренних стенках прямоугольного волновода показана на рисунке 1, выбор места для прорезания синфазных излучающих щелей показан на рисунке 2.

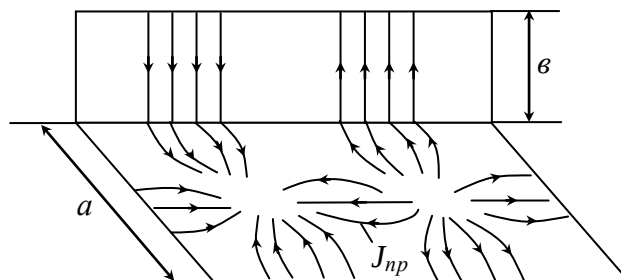


Рисунок 1

Волноводно-щелевые антенны являются одним из видов линейных многоэлементных антенн. Они обеспечивают сужение диаграммы направленности в плоскости, проходящей через ось волновода.

Волноводно-щелевые антенны обладают рядом преимуществ перед другими типами антенн:

1) ВЩА являются не выступающими антеннами и поэтому с успехом используются на летательных аппаратах.

2) В таких антеннах могут быть реализованы диаграммы направленности различной формы, так как распределение поля в раскрыве может меняться за счет изменений связи излучателя с волноводом.

3) ВЩА имеет простую конструкцию и удобна в эксплуатации.

4) ВЩА обеспечивают частотное сканирование диаграммы направленности.

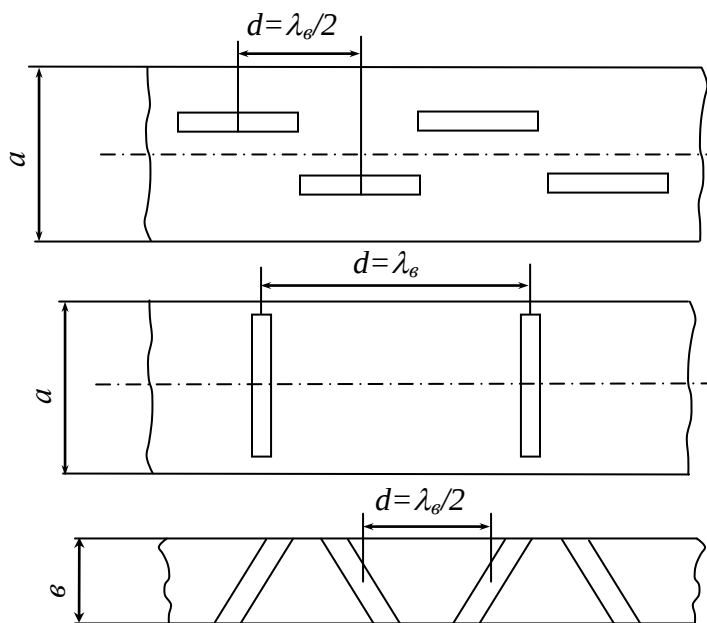


Рисунок 2

Недостатком ВЩА является трудность использования ее в широком диапазоне волн.

В данной лабораторной работе исследуется ВЩА с наклонными щелями в узкой стенке волновода, принцип действия которой поясняется рисунком 3.

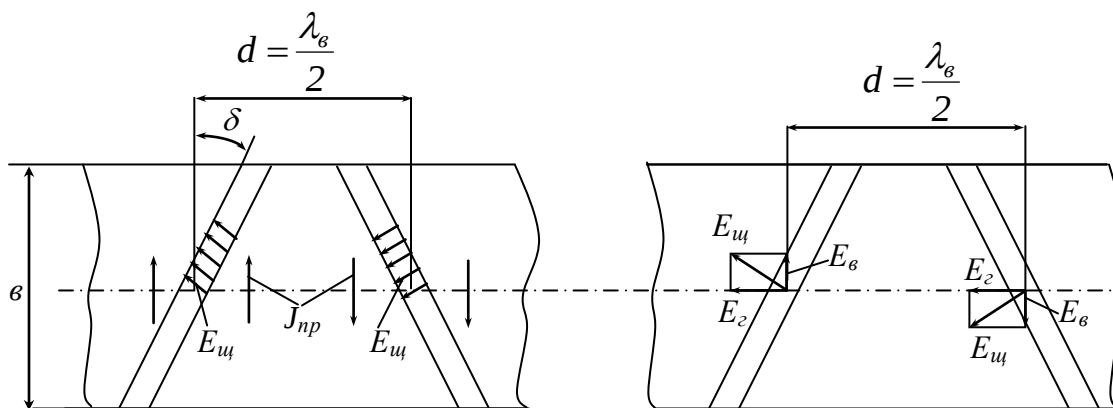


Рисунок 3

Характерной особенностью таких антенн является наличие поля излучения не только основной поляризации, но и паразитной. На рисунке 3 показано направление поперечных токов ($J_{пр}$) в узкой стенке волновода и векторов напряженности возбуждаемого электрического поля ($E_{щ}$) в двух встречно-наклонных щелях при расстоянии между ними равном $\lambda_g/2$. Излучение таких щелей в направлении нормали к волноводу определяется горизонтальными составляющими вектора напряженности поля (E_g). Вертикальные составляющие (E_v) создают поле паразитной поляризации.

Максимум излучения поля паразитной поляризации будет направлен под некоторым углом к оси волновода, который зависит от отношения длины волны в свободном пространстве (λ) к длине волны в волноводе (λ_g). Соотношение между интенсивностью излучения поля основной и паразитной поляризации определяется углом наклона щелей (δ).

Направленные свойства волноводно-щелевой антенны с встречно-наклонными щелями

Исследуемая антенна представляет собой линейную решетку идентичных переменноразно связанных с полем волновода щелей. Нормированная диаграмма направленности такой решетки имеет вид [1]:

$$F(\varphi, \Theta) = F_1(\varphi, \Theta) \cdot F_n(\Theta), \quad (1)$$

где $F_1(\varphi, \Theta)$ – диаграмма направленности одного излучателя,

$F_n(\Theta)$ – множитель решетки, зависящий от числа щелей в антенне (n),

Θ – угол в плоскости, проходящей через нормаль к решетке и ось волновода,

φ – угол в плоскости, перпендикулярной оси волновода.

Для наклонной щели в узкой стенке волновода при инженерных расчетах $F_1(\varphi, \Theta)$ можно определить по формулам:

$$F_1(\varphi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \varphi\right)}{\cos \varphi} \quad (2)$$

- в плоскости, перпендикулярной оси волновода, и

$$F_1(\Theta) \approx 1$$

- в плоскости расположения щелей.

Множитель решетки $F_n(\Theta)$ зависит от числа щелей и от амплитудно-фазового распределения поля по раскрытию антенны. В данной лабораторной работе исследуется волноводно-щелевая антенна, эскиз которой представлен на рисунке 4.

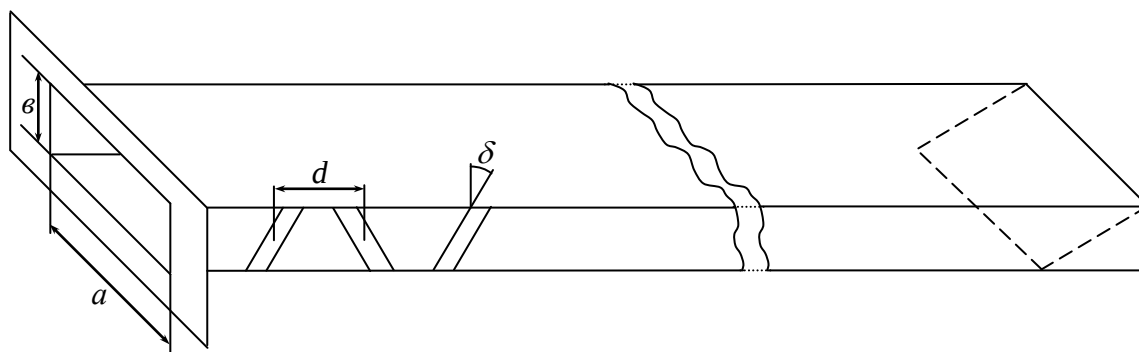


Рисунок 4

Щели находятся на одном расстоянии (d) друг от друга и наклонены под одним углом ($\pm\delta$), вследствие чего эквивалентная проводимость щелей будет также одинакова и равна [3]:

$$g = \frac{30}{73\lambda} \cdot \frac{\lambda_{\theta}}{\lambda} \cdot \frac{\lambda^4}{a^3 \theta} \cdot \left[\frac{\sin \delta \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda}{\lambda_{\theta}} \cdot \sin \delta\right)}{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\theta}}\right)^2 \sin^2 \delta} \right] \quad (3)$$

Антенна работает в режиме бегущей волны, поскольку на конце ее установлена согласованная нагрузка.

С учетом всего этого фаза поля в раскрыве антенны будет меняться по линейному закону, а амплитуда будет убывать по экспоненциальному закону, так как амплитуда волны, бегущей в волноводе убывает вследствие излучения щелей.

Множитель решетки $F_n(\Theta)$ для такого распределения поля имеет вид [3]:

$$F_n(\Theta) = \frac{sh \xi / n}{sh \xi} \sqrt{\frac{\sin^2 U + sh^2 \xi}{\sin^2 U / n + sh^2 \xi / n}}, \quad (4)$$

где $U = \frac{kL}{2} (\sin \Theta - \sin \Theta_{\text{гл}})$ – обобщенная координата;

$\Theta_{\text{гл}}$ – направление главного максимума излучения;

$\xi = 1/2 \cdot \alpha L$ – величина, характеризующая неравномерность амплитудного распределения по раскрыву;

$L = d \cdot (n-1)$ – длина антенны;

α – постоянная затухания, вызванная потерями на излучение и в стенках волновода.

Потери в стенках волновода значительно меньше потерь на излучение, поэтому ими можно пренебречь.

Коэффициент затухания за счет излучения полностью определяется проводимостью щели и расстоянием между ними и равен:

$$\alpha = \frac{1}{3d} \ln(1 + g). \quad (5)$$

Отклонение главного максимума диаграммы направленности от нормали к оси волновода может быть определено по формуле

$$\sin \Theta_{\text{гл}} = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} - \frac{\lambda}{2d}. \quad (6)$$

Скорость изменения положения луча антенны в пространстве при изменении частоты (длины волны) называется углочастотной чувствительностью антенны (А):

$$A = \frac{\partial \Theta_{\text{гл}}}{\frac{\partial f}{f} 100\%} \cdot \left(\frac{\text{град}}{\% \text{ изм частоты}} \right). \quad (7)$$

После подстановки (6) в (7) получаем:

$$A = \frac{0,573}{\cos \Theta_{\text{гл}}} \left(\sin \Theta_{\text{гл}} - \frac{1}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \right). \quad (8)$$

Коэффициент направленного действия (D) волноводно-щелевой антенны может быть определен по формуле[3]:

$$D \cong 3,2n, \quad (9)$$

где n – число щелей.

Приближенно коэффициент направленного действия можно так же оценить по ширине диаграммы направленности [1]:

$$D = \frac{34000}{2\Theta_{0,5H}^0 \cdot 2\Theta_{0,5E}^0}, \quad (10)$$

где $2\Theta_{0,5H}$ – ширина диаграммы направленности в плоскости вектора H ;

$2\Theta_{0,5E}$ – ширина диаграммы направленности в плоскости вектора E .

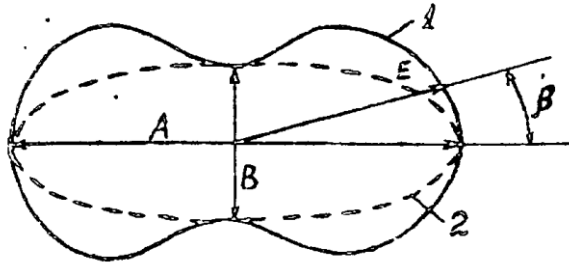
Уровень боковых лепестков (q):

$$q = \frac{F(\Theta_{бок})}{F(\Theta_{эл})}, \quad (11)$$

где $F(\Theta_{эл})$ – значение функции направленности при Θ , соответствующем максимуму излучения в главном лепестке;

$F(\Theta_{бок})$ – значение функции направленности при Θ , соответствующем максимуму излучения в боковом лепестке.

Поляризационная характеристика антенны (поляризационный эллипс) определяется поляризационной диаграммой направленности, то есть зависимостью ЭДС в исследуемой приемной антенне от угла поворота (β) плоскости поляризации передающей антенны с линейной поляризацией (рисунок 5).



1 – поляризационная диаграмма;

2 – поляризационный эллипс;

A и B – большая и малая оси поляризационного эллипса.

Рисунок 5

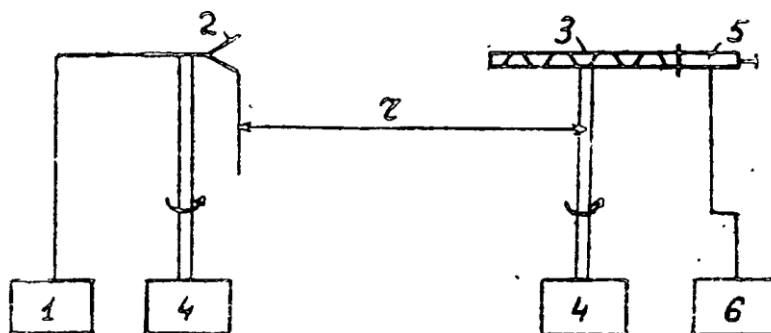
Коэффициент равномерности поляризационной характеристики

$$m = \frac{B}{A} = \frac{E_{min}}{E_{max}}, \quad (12)$$

где E_{min} и E_{max} – минимальное и максимальное значения ЭДС в приемной антенне.

Описание лабораторной установки

Экспериментальное исследование волноводно-щелевой антенны производится на установке, блок-схема которой приведена на рисунке 6.



- 1 – генератор манипулированных СВЧ сигналов;
- 2 – передающая измерительная антенна П6-35;
- 3 – исследуемая в режиме приема волноводно-щелевая антенна;
- 4 – поворотные механизмы передающей и приемной антенны;
- 5 – детекторная секция;
- 6 – индикаторный прибор.

Рисунок 6

Генератор манипулированных СВЧ сигналов – свип-генератор панорамного измерителя $K_{св}$ Р2-67. Представляет собой генератор с электронной перестройкой частоты на лампе обратной волны. В работе используется в режиме амплитудной модуляции с ручной перестройкой частоты в пределах от 12 до 17 ГГц.

Измерительная антенна П6-35 – зеркальная антенна с рупорно-параболическим облучателем. Антенна имеет линейную поляризацию. Фидерный тракт облучателя имеет вращающийся участок, обеспечивающий вращение плоскости поляризации. При вращении этого участка вместе с облучателем и отражателем (зеркалом) излучение антенны поворачивается по азимуту. Отражатель, установленный под углом 45° к оси излучения облучателя может поворачиваться вокруг этой оси. При повороте отражателя излучение антенны поворачивается по углу места. При повороте вращающегося участка фидерного тракта, поле в его верхнем сечении поворачивается вокруг оси фидерного тракта, что приводит к повороту плоскости поляризации излучения облучателя и всей антенны.

Исследуемая волноводно-щелевая антенна – отрезок прямоугольного волновода сечением 16×8 мм с встречно-наклонными щелями в узкой стенке волновода. С одной стороны антенна нагружена на поглощающую согласованную нагрузку, с другой – на детекторную волноводную секцию. Число щелей в антенне $n=18$, угол наклона щелей $\delta = \pm 15^\circ$, расстояние между щелями $d = 14$ мм, длина каждой щели $l = 10$ мм, ширина щели $t = 1$ мм.

В целях обеспечения необходимой точности при проведении измерений на лабораторной установке, расстояние между приемной и передающими антеннами должно быть достаточно большим для того, чтобы приемная антенна находилась в дальней зоне поля излучения передающей антенны и чтобы волна в месте расположения приемной антенны была однородной. Для выполнения этих условий должно выполняться соотношение [1]:

$$r \geq (L + d_A)^2 / \lambda$$

где r – расстояние между антеннами;

$L = d(n-1)$ – размер апертуры исследуемой антенны ($L=25$ см);

d_A – размер апертуры передающей антенны ($d_A=15$ см);

λ – рабочая длина волны.

Содержание работы

- 1) Определение поляризационной характеристики и коэффициента ее равномерности.
- 2) Снятие диаграммы направленности антенны в горизонтальной и вертикальной плоскости на фиксированной частоте.
- 3) Определение уровня боковых лепестков диаграммы направленности.
- 4) Определение положения максимумов излучения паразитной поляризации.
- 5) Снятие зависимости от частоты положения главного максимума излучения.
- 6) Определение углочастотной чувствительности антенны.
- 7) Теоретический расчет диаграммы направленности и углочастотной чувствительности антенны.

Порядок выполнения работы

- 1) Изучить устройство щелевой антенны и ознакомиться с лабораторной установкой.
- 2) Включить блок питания генераторного блока панорамного измерителя $K_{св}$ Р2-67 и индикаторный прибор исследуемой антенны.
- 3) Произвести взаимную ориентировку антенн, для чего:
 - а) с помощью оптических визиров навести передающую антенну по углу азимута и углу места на исследуемую антенну;
 - б) с помощью поворотного устройства исследуемой антенны настроиться на максимум показаний индикаторного прибора;
 - в) уточнить ориентировку передающей антенны путем настройки на максимум показаний индикаторного прибора приемной антенны.
- 4) Снять поляризационную диаграмму направленности волноводно-щелевой антенны.
- 5) Установить поляризацию передающей антенны, соответствующую

максимуму показаний индикатора приемной антенны.

6) Снять диаграмму направленности антенны в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

7) Изменить поляризацию передающей антенны на 90° .

8) Определить положение максимумов излучения поля паразитной поляризации.

9) Установить поляризацию передающей антенны соответственно пункту 5.

10) Снять зависимость положения главного максимума излучения от частоты генератора. Частоту менять в пределах $12 \div 16$ ГГц с интервалом в 1 ГГц.

11) По результатам измерений определить коэффициент неравномерности поляризационной характеристики, уровень боковых лепестков, углочастотную чувствительность, коэффициент направленного действия.

12) Произвести теоретический расчет основных характеристик антенны по формулам (1), (2), (4), (6), (8), (9). Расчет диаграммы направленности произвести на фиксированной частоте ($f=14$ ГГц).

ПРИМЕЧАНИЕ. При построении экспериментально снятых диаграмм направленности необходимо учитывать квадратичность характеристики детектора, вследствие чего:

$$F(\varphi, \Theta) = \sqrt{\alpha(\varphi, \Theta)} / \sqrt{\alpha_{\text{max}}(\varphi, \Theta)}$$

где $\alpha(\varphi, \Theta)$ – зависимость показаний индикаторного прибора от ориентации антенны в пространстве.

Содержание отчета

- 1) Общая схема установки.
- 2) Основные расчетные соотношения.
- 3) Результаты экспериментального исследования.
- 4) Результаты теоретического расчета основных характеристик антенны.
- 5) Краткие выводы по работе.

Вопросы для самопроверки

1) На каком принципе основывается работа волноводно-щелевой антенны?

2) От чего зависит проводимость наклонной щели в узкой стенке прямоугольного волновода?

3) Почему щели в узкой стенке прямоугольного волновода наклонены в разные стороны?

4) Чем определяются диаграммы направленности в плоскости, проходящей через ось волновода и в плоскости, перпендикулярной оси волновода?

5) Что такое поляризационный эллипс?

6) Чем определяется уровень излучения паразитной поляризации?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
И СПИРАЛЬНОЙ АНТЕНН

Цель работы: исследование диаграмм направленности и поляризационных характеристик диэлектрической стержневой и цилиндрической спиральной антенны.

Общие положения

Диэлектрическая стержневая антенна

Антенна представляет собой отрезок диэлектрического волновода (стержень) круглого, эллиптического или прямоугольного сечения в несколько длин волн, выполненного из материала с малыми потерями. Диэлектрический стержень с одного конца возбуждается отрезком металлического волновода с возбудителем (рисунок 1).

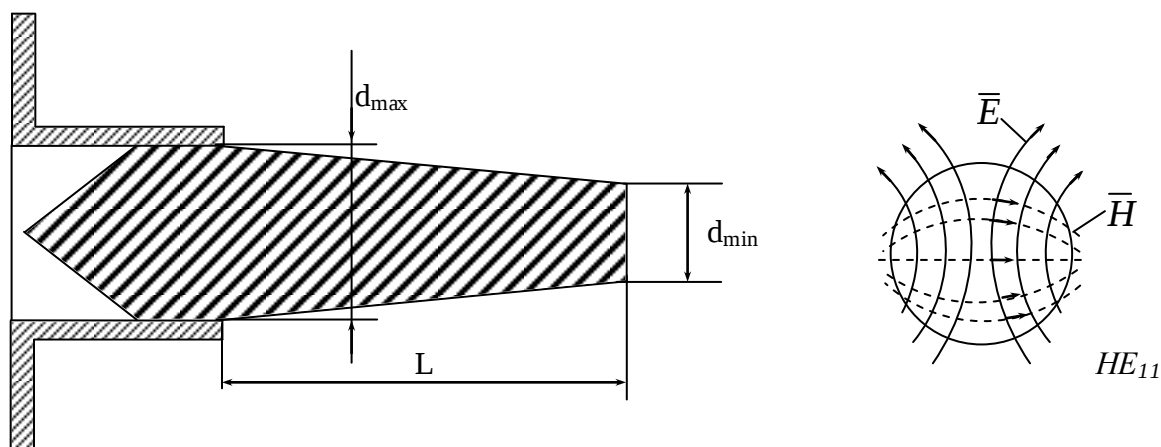


Рисунок 1

При указанном способе возбуждения в диэлектрическом стержне возбуждается волна низшего типа HE_{11} , структура поля которой в поперечном сечении приведена на рисунке 1. Чтобы в диэлектрическом стержне возбуждалась только одна волна типа HE_{11} , его диаметр выбирают из условия:

$$d_{max} = \frac{\lambda}{\sqrt{\pi(\epsilon - 1)}},$$

где λ - длина волны в свободном пространстве,

ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость материала стержня.

Фазовая скорость волны HE_{11} зависит от диаметра стержня и изменяется в пределах от скорости, близкой к скорости света (c) (тонкий стержень), до скорости, равной $c/\sqrt{\epsilon}$ (толстый стержень). Для уменьшения отражений, т.е. согласования стержня с окружающей средой и уменьшения уровня боковых лепестков, его свободный конец сужают до величины, определяемой равенством:

$$d_{min} = 0,63d_{max}.$$

Волна HE_{11} вызывает поляризацию диэлектрика вдоль силовых линий электрического поля. Поляризационные токи в свою очередь могут рассматриваться как элементарные излучатели, сдвинутые между собой по фазе, как в бегущей волне. Поле излучения всей системы будет определяться как поле решетки элементарных излучателей:

$$F(\Theta) = F_1(\Theta) \cdot F_n(\Theta); \quad (1)$$

где $F_1(\Theta)$ - функция направленности элементарного излучателя, $F_n(\Theta)$ - множитель решетки излучателей.

$$F_1(\Theta) \approx J_0(k \cdot a \cdot \sin \Theta); \quad (2)$$

где J_0 - функция Бесселя нулевого порядка от аргумента $(k \cdot a \cdot \sin \Theta)$;

$k = 2\pi/\lambda$ - волновое число для свободного пространства;

a - средний радиус сечения стержня;

Θ - угол, отсчитываемый от оси антенны.

$$F_n(\Theta) = \frac{\sin \left[\frac{\pi L}{\lambda} \left(\frac{c}{V_\phi} - \cos \Theta \right) \right]}{\frac{\pi L}{\lambda} \left(\frac{c}{V_\phi} - \cos \Theta \right)}; \quad (3)$$

где L - длина стержня;

c/V_ϕ - относительная фазовая скорость волны в антенне.

Множитель $F_1(\Theta)$ с изменением Θ меняется незначительно, и поэтому для стержней в несколько длин волн $F(\Theta) \approx F_n(\Theta)$.

Диэлектрическая стержневая антенна, поскольку она является антенной бегущей волны с замедленной фазовой скоростью, имеет оптимальную длину, определяемую формулой:

$$\frac{L}{\lambda} = \frac{1}{2(c/V_\phi - 1)}.$$

Относительная фазовая скорость определяется ε и диаметром стержня и может быть найдена из графиков [1].

Цилиндрическая спиральная антенна

Цилиндрическая спиральная антенна относится к классу антенн бегущей волны с вращающейся поляризацией поля (рисунок 2).

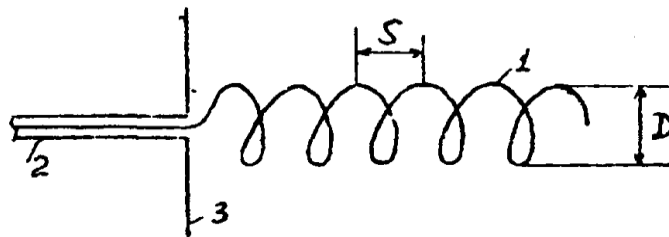


Рисунок 2

Она представляет собой проволочную спираль 1, являющуюся продолжением внутреннего проводника коаксиального кабеля 2, экранирующая оболочка которого соединяется с металлическим экраном 3. Экран играет роль противовеса, через который частично замыкается ток питания антенны, а также выполняет роль рефлектора, ослабляющего излучение в заднюю полусферу. При периметре витка порядка $(0,75-1,3)\lambda$ максимальное излучение антенны наблюдается вдоль ее оси.

При размерах антенны, соответствующих режиму осевого излучения на спиральном излучателе устанавливается почти чисто бегущая волна тока. В этом случае диаграмму направленности спиральной антенны можно представить произведением диаграммы направленности одного витка на множитель решетки. Одиночный виток характеризуется слабой направленностью [1], поэтому для практических целей можно считать, что диаграмма направленности спирали определяется множителем решетки:

$$F(\Theta) \cong F_n(\Theta) = \frac{\sin \left[\frac{nk}{2} (\xi L - s \cdot \cos \Theta) \right]}{n \cdot \sin \left[\frac{k}{2} (\xi L - s \cdot \cos \Theta) \right]}; \quad (4)$$

где n - число витков;

S - шаг спирали;

ξ - коэффициент укорочения волны в спирали (в режиме осевого излучения $\xi=1,22$);

L - длина витка спирали ($L = \sqrt{(\pi D)^2 + S^2}$);

Θ - угол, отсчитываемый от оси антенны;

$k = 2\pi/\lambda$ - волновое число для свободного пространства.

Спиральная антенна в режиме осевого излучения создает поле круговой поляризации в направлении оси системы. В направлениях под углом к оси спирали имеет место эллиптическая поляризация, переходящая в линейную в направлении, перпендикулярном к оси.

Коэффициент равномерности поляризационной характеристики равен:

$$m = \frac{E_{min}}{E_{max}} = \sqrt{\frac{\alpha_{min}}{\alpha_{max}}}; \quad (5)$$

где E_{min} и E_{max} - минимальное и максимальное значение ЭДС в приемной антенне с линейной поляризацией при повороте ее вокруг своей оси;

α_{min} и α_{max} - соответствующие им показания индикатора при использовании квадратичного детектора.

Коэффициент равномерности поляризационной характеристики будет зависеть от направления в пространстве.

Описание установки

Общий вид измерительной установки для исследования стержневой диэлектрической антенны приведен на рисунке 3.

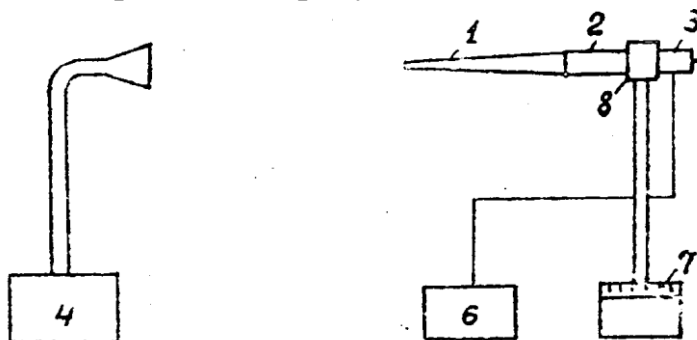


Рисунок 3

Диэлектрическая антенна, входящая в приемную часть и подлежащая исследованию, состоит из диэлектрического стержня 1, отрезка возбуждающего волновода 2 и детекторной волноводной секции 3. Все волноводные элементы имеют прямоугольное сечение размером $28,5 \times 12,6$. При использовании диэлектрических стержней круглого сечения в качестве возбуждающего волновода берут круглый волновод с волной H_{11} , который затем переходит в прямоугольный волновод с волной H_{10} с помощью добавочного волноводного перехода. Передающая часть установки состоит из клистронного генератора СВЧ 4, высокочастотные колебания от которого поступают по волноводу прямоугольного сечения в рупорную антенну 5. Все волноводные элементы установки соединяются с помощью гладких и дроссельных фланцев. Принятый приемной антенной и продетектированный сигнал передается на индикатор 6.

Исследуемая антенна может поворачиваться в горизонтальной плоскости, при этом угол поворота измеряется при помощи лимба 7. Изменение поляризации волны приемной антенны производится путем ее поворота в держателе 8 вокруг горизонтальной оси. В передающей антенне поляризация волны изменяется с помощью скрученной секции.

Общий вид установки для исследования цилиндрической спиральной антенны приведен на рисунке 4.

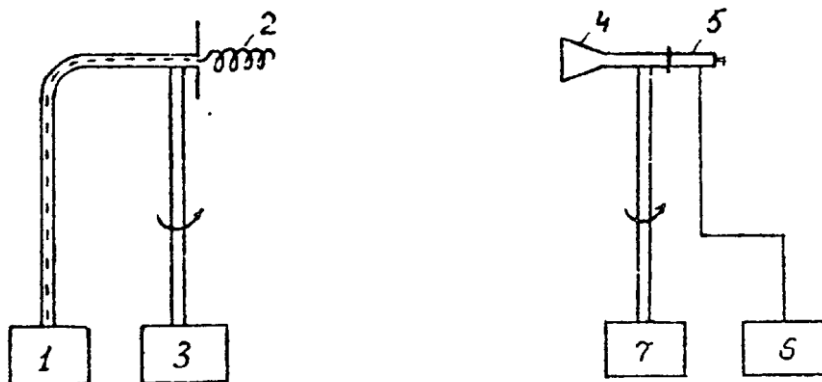


Рисунок 4

Здесь 1 - генератор СВЧ; 2 - передающая спиральная антенна, расположенная на поворотном устройстве 3; 4 - приемная рупорная антенна; 5 - коаксиальная детекторная секция; 6 - индикатор; 7 - поворотное устройство. Поворотные устройства 3 и 7 снабжены шкалами для отсчета углов поворота антенн в горизонтальной плоскости. Приемная рупорная антенна имеет дополнительное поворотное устройство, позволяющее вращать рупор вокруг его оси для изменения направления линейной поляризации в пространстве.

Исследование цилиндрической спиральной антенны производится в передающем режиме.

Содержание работы

Исследование диэлектрической стержневой антенны

- 1) Снятие диаграмм направленности диэлектрической антенны в H - и E -плоскостях на частоте, указанной руководителем.
- 2) Снятие диаграмм направленности диэлектрической антенны (по указанию руководителя) на частотах, отличающихся от первоначальной на $\pm 20\%$.
- 3) Построение диаграмм направленности исследуемых антенн согласно измерениям по пп. 1 и 2.
- 4) Расчет по формуле (3) и построение диаграммы направленности исследуемой диэлектрической антенны на средней частоте и сравнение ее с полученной экспериментально.

Исследование спиральной антенны

- 1) Снятие диаграмм направленности спиральной антенны на трех частотах ее рабочего диапазона, указанных руководителем.
- 2) Определение коэффициента равномерности поляризационной характеристики в интервале изменения угла θ от 0 до 90° , отсчитываемого от оси спирали.
- 3) Расчет по формуле (4), построение диаграммы направленности исследуемой спиральной антенны на основной частоте рабочего диапазона и сравнение ее с полученной экспериментально.

Порядок выполнения работы

Перед началом проведения измерений ознакомиться с описанием и лабораторной установкой, измерить основные геометрические размеры антенн. Проверить правильность установки антенн. Расстояние между ними должно удовлетворять соотношению:

$$r \geq 2(d_1^2 + d_2^2)/\lambda$$

где d_1 и d_2 - максимальные размеры апертур приемной и передающей антенн.

Для исследования диэлектрической стержневой антенны следует:

- 1) Соединить генератор с передающей антенной и приемную антенну с детекторной секцией и усилителем.
- 2) Включить генератор СВЧ и установить требуемую частоту.
- 3) Включить индикатор и настроить детекторную секцию.
- 4) Провести измерения согласно содержанию работы.

Порядок исследования цилиндрической спиральной антенны аналогичен, за исключением замены генераторов СВЧ и волноводной детекторной секции на коаксиальную.

При снятии диаграммы направленности передающая цилиндрическая антенна последовательно вращается в горизонтальной плоскости. Приемная антенна неподвижна и лишь вращается на угол 90° вокруг оси рупора для смены поляризации.

Коэффициент равномерности поляризационной характеристики определяется путем вращения приемной рупорной антенны вокруг ее продольной оси и фиксации максимальных и минимальных показаний измерительного прибора. Ось рупорной антенны не меняет своего направления, в то время как ось спиральной антенны последовательно поворачивается на определенный угол.

Содержание отчета

- 1) Общие схемы установки.
- 2) Экспериментальные и расчетные данные для построения диаграмм направленности и поляризационных характеристик исследуемых антенн.
- 3) Экспериментальные и расчетные диаграммы направленности и поляризационные характеристики.
- 4) Краткие выводы о работе.

Вопросы для самопроверки

- 1) Что из себя представляет диэлектрическая антенна и в чем состоит принцип ее работы?
- 2) Каким образом определить поляризацию волны, излучаемой диэлектрической антенной?
- 3) Как выбираются максимальный и минимальный диаметры стержня?
- 4) Как зависит ширина диаграммы направленности от изменения частоты и длины диэлектрического стержня?
- 5) Какие типы волн возбуждаются в диэлектрической антенне?
- 6) Что из себя представляет цилиндрическая спиральная антенна?
- 7) Как определить диаграммы направленности цилиндрической спиральной антенны, работающей в режиме осевого излучения?
- 8) Каково назначение диска спиральной антенны?
- 9) В каких режимах излучения может работать спиральная антенна в зависимости от отношения ее диаметра к длине волны?

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ

1) К работе допускаются лица, ознакомленные с программой проводимых работ и прошедшие общий инструктаж по технике безопасности в лаборатории “Антенны и устройства СВЧ” кафедры «Радиофизика и электроника».

2) Для уменьшения воздействия СВЧ-излучения работа на излучение должна проводиться только на время измерения параметров и характеристик антенн. С той же целью при проведении измерений чувствительность приемных измерительных приборов делается максимальной, и, соответственно, уменьшается мощность излучения передающих антенн.

3) При любой возникшей неисправности в установке немедленно обращаться к дежурному лаборанту или преподавателю. Категорически запрещается пытаться самостоятельно исправлять возникшие дефекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Нефедов Е.И. Устройства СВЧ и антенны: Учебное пособие для вузов/ Е.И. Нефедов.-М.: Академия, 2009.-375с.

2 Фельд Я.Н. Основы теории антенн: Учебное пособие для вузов/ Я.Н. Фельд, Л.С. Бененсон. 2-е изд. переработанное.-М.:Дрофа, 2009.-491с.

3 Драбкин А.Л. Антенно-фидерные устройства / А.Л. Драбкин, В.Л. Зузенко, А.Г. Кислов. - 2-е изд. - М.: Сов. радио, 1974.

4 Фрадин А.З. Измерения параметров антенно-фидерных устройств / А.З. Фрадин, Е.В. Рыжков. - 2-е изд. - М.: Связь, 1972.

