

Лабораторная работа 2

ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫЕ АНТЕННЫ

Целью работы является изучение основных свойств линейных антенных решеток: выяснение влияния формы амплитудного распределения и распределения фазы возбуждения на основные параметры антенны, выявление условий возникновения в диаграммах направленности (ДН) побочных максимумов.

Свойства линейных антенных решеток изучаются в работе на примере волноводных щелевых антенн. Из двух видов этих антенн исследуются только нерезонансные решетки, нашедшие на практике наиболее широкое распространение. Резонансные решетки в силу их узкополосности применяются мало и в работе не исследуются,

2.1. Описание макетов и методики экспериментов

Влияние формы распределения амплитуды и фазы возбуждения на ДН исследуется на двух различных макетах. Для исследования формы распределения амплитуды возбуждения на ДН используется макет № 1 (рис. 2.1) с продольными щелями, прорезанными точно по центру широкой стенки волновода. Без дополнительных устройств такие щели не возбуждаются полем волновода и для их возбуждения введены штыри (рис. 2.1). Глубиной погружения штыря регулируется степень возбуждения щели.

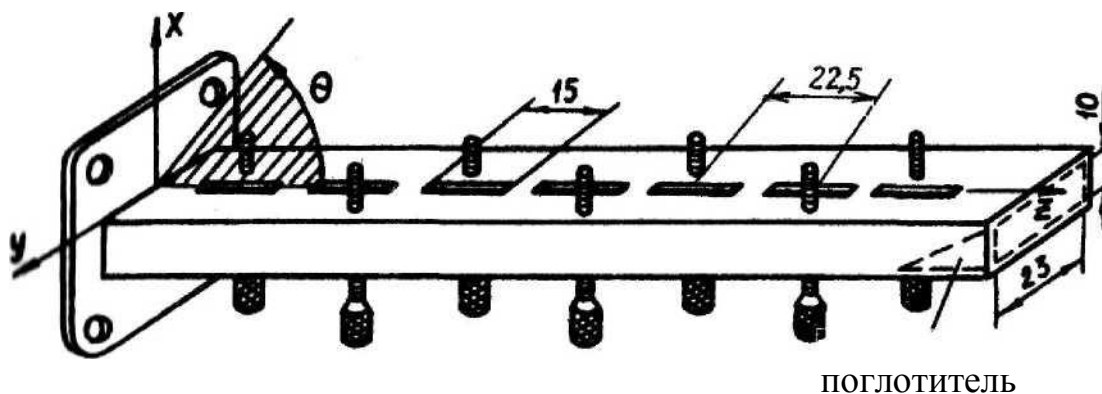


Рис. 2.1. Макет нерезонансной волноводно-щелевой антенны с продольными щелями, прорезанными посередине широкой стенки

Практически операция подбора закона возбуждения щелевой антенны осуществляется на вспомогательной установке, имеющей измерительный зонд (рис. 2.2), который может перемещаться вдоль антенной решетки. Измерительный зонд представляет собой детектор, используемый в качестве короткого электрического вибратора, с высокоомной подводкой, практически не влияющей на электромагнитное поле антенны. Антенная решетка в этом случае работает в передающем режиме и возбуждается выносной клистронной головкой или специальной волноводной секцией. Сама установка располагается на лабораторном столе. Для уменьшения СВЧ излучения решетка располагается щелями вниз к основанию установки, покрытому слоем поглощающего материала. Реактивные возбуждающие штыри запрессованы в диэлектрические винты, головки которых выведены на противоположную щелям широкую, стенку волновода. При этом влияние рук оператора практически не сказывается на результатах настройки антенны.

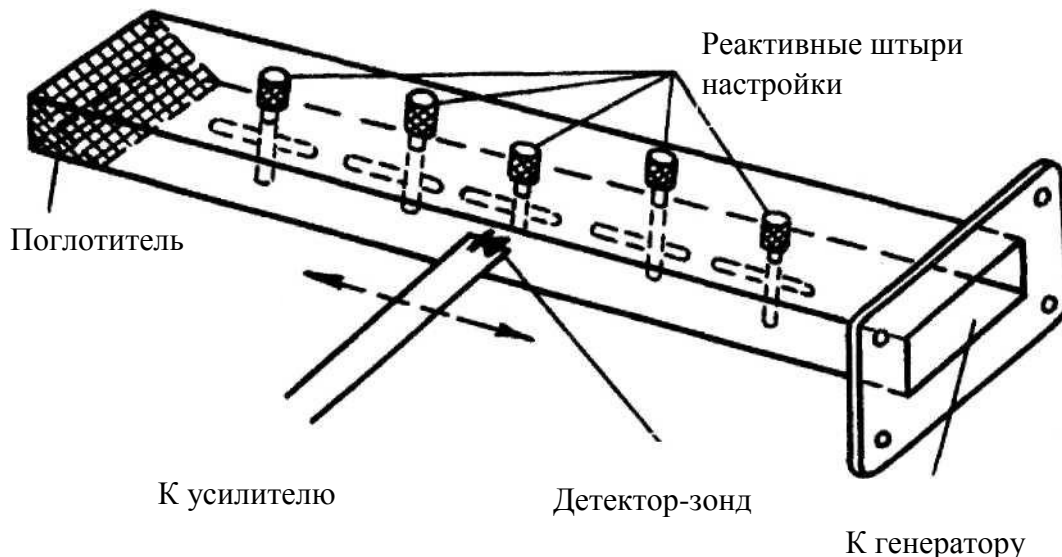


Рис. 2.2. Макет с настроечными винтами

Сама настройка антенны на требуемое амплитудное распределение осуществляется путем последовательной настройки винтов щелей. При этом в начале эксперимента все винты должны быть максимально ввернуты, а зонд подведен к последней щели, расположенной около поглощающей нагрузки. Первоначально винт настройки этой щели вывинчивается на глубину, при которой осуществляется отчетливая индикация сигнала с зонда (примерно 20 делений шкалы при максимальной чувствительности усилителя). Затем зонд перемещается к другой щели и т.д. После первоначальной настройки всех щелей на заданное амплитудное распределение настройка повторяется уже от начала антенны. Минимальная степень связи последней щели и всех остальных обеспечивает режим бегущей волны на всех участках волновода с расположенными на нем щелями.

При равномерном распределении возбуждения и линейном изменении фазы множитель направленности линейной антенной решетки определяется формулой

$$f_N(\vartheta) = \frac{\sin \left[\frac{Nkd}{2} (\cos \vartheta - \xi) \right]}{N \sin \left[\frac{kd}{2} (\cos \vartheta - \xi) \right]}, \quad (2.1)$$

где N - число элементов в решетке;
 d - расстояние между элементами;

θ - угол, отсчитываемый от оси решетки, вдоль которой располагаются излучатели;

k - волновое число, $k = 2\pi/\lambda$;

λ - длина волны в свободном пространстве;

ξ - коэффициент замедления фазовой скорости возбуждения

$\xi = \Delta\Phi/(kd)$;

$\Delta\Phi$ - сдвиг по фазе между двумя соседними элементами решетки.

В случае расположения реактивных штырей по разные стороны от щелей фазовый сдвиг ДФ изменится дополнительно на 180°

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi d}{\lambda_e} - \pi, \quad (2.2)$$

Где $\lambda_e = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}$, a - размер широкой стенки волновода.

Диаграмма направленности решетки в плоскости XZ определяется произведением множителя направленности (2.1) на диаграмму направленности отдельного элемента решетки, которая имеет вид для продольных полуволновых щелей (без учета влияния внешних размеров волновода):

$$F_1(\vartheta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\vartheta\right)}{\sin\vartheta} \quad (2.3)$$

Для поперечных (приблизительно и для наклонных) щелей при тех же предположениях можно считать $F_1(\theta) = 1$.

Спадающее к краям распределение возбуждения щелей по решетке приводит к снижению уровня боковых лепестков по сравнению с равномерным. Одновременно расширяется основной лепесток ДН.

Если взять распределение поля в форме (см. рис. 2.3)

$$I(z) = 1 + \Delta \cos(2\pi z/L); \quad |z| \leq L/2, \quad (2.4)$$

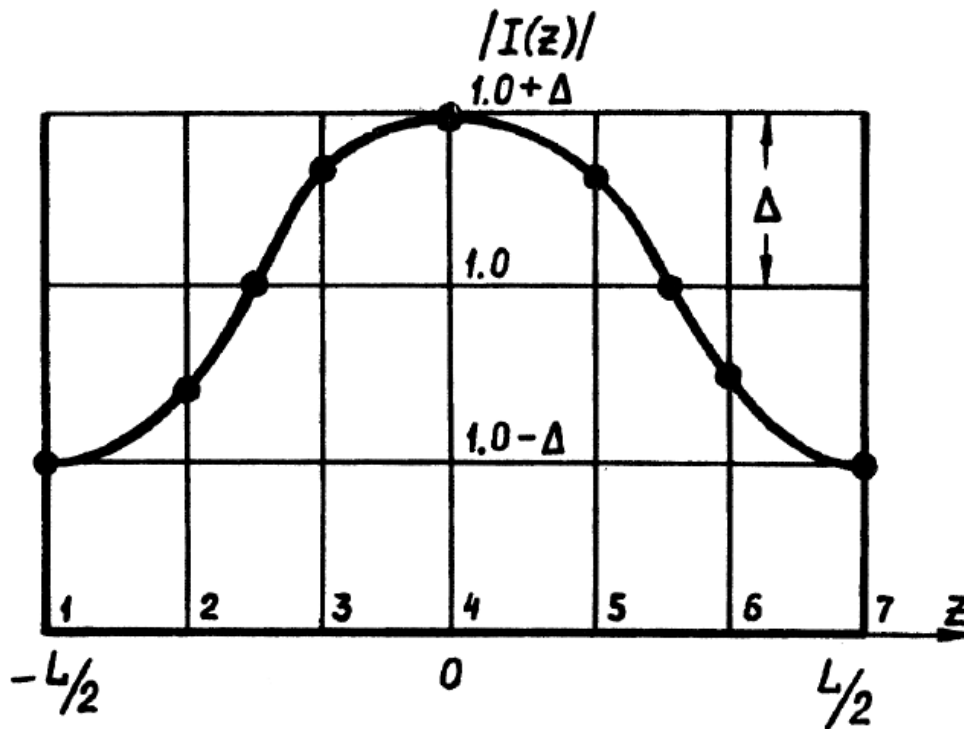


Рис. 2.3. Распределение поля вдоль антенны

где L - общая длина антенны; Δ - параметр, определяющий величину относительного уменьшения возбуждения щелей на краю антенны по отношению к середине, то уровень наибольшего бокового лепестка подчиняется приближенному соотношению

$$\text{УБЛ} \approx - [13 + 13\Delta + 22\Delta^2] \text{ дБ.} \quad (2.5)$$

При этом ширина луча по половинной мощности определяется также приближенной формулой

$$\Delta\theta_{0.5} \approx [51^\circ \lambda / (L \sin\theta_{\text{гл}})] [1 + 0.636\Delta^2] \quad (2.6)$$

где множитель $51^\circ \lambda / (L \sin\theta_{\text{гл}})$ есть ширина основного луча линейного излучателя с равномерным амплитудным распределением и фазовым сдвигом между излучателями $\Delta\Phi$, обеспечивающим положение главного максимума в направлении

$$\theta_{\text{гл}} = \arccos \xi. \quad (2.7)$$

Если исключить возбуждение четных щелей антенны № 1

(полностью вывернув из волновода второй, четвертый и шестой винты), то образуется решетка из четырех излучателей с расстоянием между ними 45мм, т.е. почти в полтора раза большим, чем длина волны в свободном пространстве. Во-первых, у такой решетки фазовый сдвиг уже не определяется формулой (2.2), а равен $\Delta\Phi = 2\pi d / \lambda_{\text{в}}$. Во-вторых, в зоне видимости множителя направленности оказываются три лепестка с единичной амплитудой. А это значит, что в ДН решетки будут наблюдаться три лепестка высокого уровня. Из-за неравномерности ДН одного элемента (2.3) эти лепестки будут разными.

Как следует из формулы (2.7), направление главного максимума ДН волноводно-щелевых решеток с линейным законом распределения фазы зависит от коэффициента замедления $\xi = \Delta\Phi/(kd)$, который с помощью соотношения (2.2) может быть преобразован к виду

$$\xi = (\lambda / \lambda_{\text{в}}) [1 - \lambda_{\text{в}}/(2d)]. \quad (2.8)$$

Поэтому направление главного максимума ДН такой решетки зависит от соотношения фазовой скорости волны в волноводе и расстояния между щелями. Каждая бригада исследует ДН трех волноводно-щелевых антенн, выполненных по одной схеме (рис. 2.4, макет № 2) и отличающихся друг от друга только размером широкой стенки волновода, т.е. фазовой скоростью возбуждения.

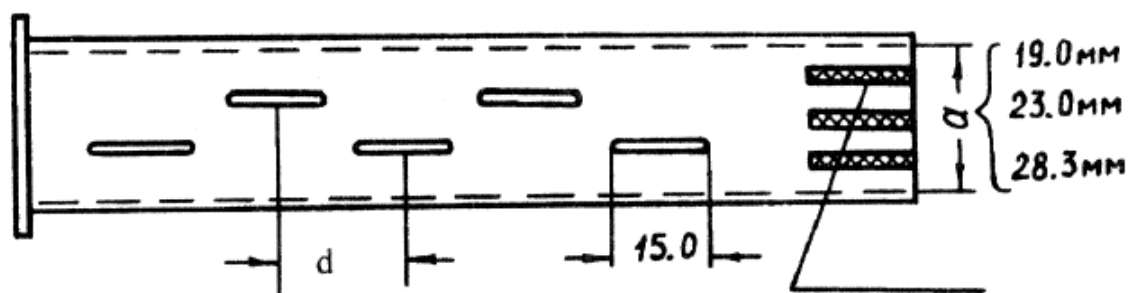


Рис. 2.4. Антенна со смещёнными продольными щелями

Описанный выше стенд (рис. 2.2) с измерительным зондом используется в лабораторной работе также для выявления эквивалентной схемы продольной и поперечной щелей, прорезанных в широкой стенке волновода. Для этого имеются специальные волноводные секции с одиночными щелями и перемещаемым закорачивающим поршнем. Зонд устанавливается против исследуемой щели и снимается зависимость показаний прибора от положения закорачивающего поршня относительно сечения расположения щели в волноводе.

С точки зрения реакции на режим волновода щель может быть представлена на эквивалентной схеме как некоторая сосредоточенная нагрузка линии передачи (рис 2.5) в виде последовательного сопротивления или параллельной проводимости в зависимости от того, какими токами возбуждается та или иная щель. Поэтому по зависимости степени возбуждения щели от положения поршня легко определяется эквивалентная схема щелевой антенны.

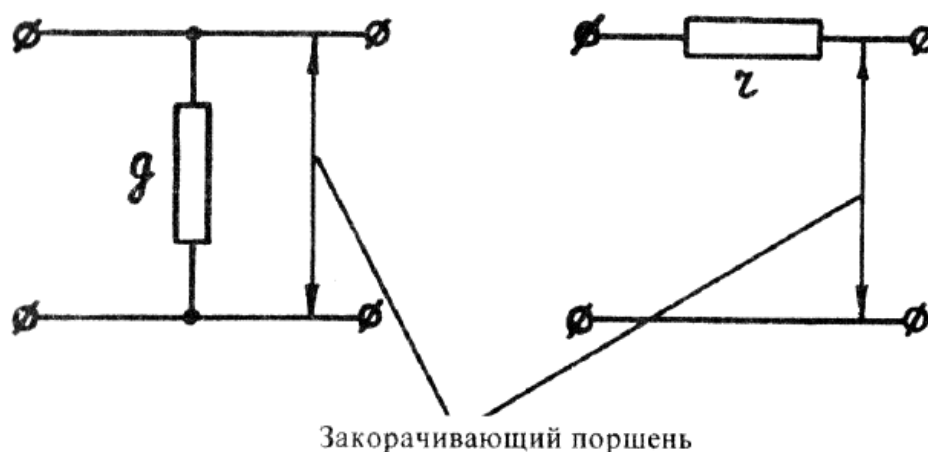


Рис. 2.5. Эквивалентные схемы продольной и поперечной щелей

2.2. Расчетное задание

1. Рассчитать направления максимального излучения и ширину главного луча по половинной мощности для трех вариантов волноводно-щелевой антенны № 2 (рис. 2.4). Расстояния между щелями d и число щелей N каждая бригада берет из табл. 2.1. В таблице приведена маркировка самих антенн.

2. Рассчитать и построить зависимость ширины главного луча по половинной мощности $\Delta\theta_{0.5}$ и уровня максимальных боковых лепестков УБЛ щелевой волноводной антенны № 1 (рис. 2.1) в

зависимости от величины Δ ($0 < \Delta < 1,0$ с шагом 0,25), $N=7$, $\lambda = 3,2\text{см}$.

3. Рассчитать и построить в декартовых координатах нормированную диаграмму направленности в плоскости вектора H антенны № 1 в случае равномерного возбуждения

а) всех семи щелей ($\Delta=0$, $d = 22,5$ мм),

б) четырех щелей ($\Delta=0$, $d = 45,0$ мм).

Таблица 2.1

Расчётные задания

Бригада №		1	2	3	4	5	6
N (число элементов)		9	7	5	9	7	5
d (мм)		19,5			22,0		
a	19.0	1-I	2-I	3-I	4-I	5-I	6-I
(мм)	23.0	1-II	2-II	3-II	4-II	5-II	6-II
	28.3	1-III	2-III	3-III	4-III	5-III	6-III

В случае б) обратить внимание на существование побочных максимумов множителя направленности решетки почти единичного уровня и на некоторое их ослабление за счет направленных свойств самих щелевых антенн. В расчетах считать щели полуволновой длины.

4. Рассчитать амплитуды возбуждения щелей антенной решетки (антенна № 1) для одного значения Δ . Значение Δ каждая бригада берет из табл. 2.2.

Таблица 2.2

Расчётные задания для функции распределения поля

Бригада №	1	2	3	4	5	6
Δ	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7

2.3. Экспериментальная часть

Все измерения диаграмм направленности в данной работе ведутся на установке, описанной в лабораторной работе № 1. При окончательных измерениях индикация показаний осуществляется по стрелочному прибору. Предварительно для качественной оценки ДН просматривается на осциллографическом индикаторе с использованием автомата вращения. Особенности выносного стенда для настройки антенны № 1 на заданное амплитудное распределение и для определения эквивалентных схем щелей были рассмотрены выше.

Требования к технике безопасности при работе на стенде.

1. К работе на стенде допускаются лица, ознакомленные с программой проводимых работ и прошедшие общий инструктаж по технике безопасности в лаборатории кафедры АУ и РРВ.

2. Для исключения возможности СВЧ облучения смотровая дверка безэховой камеры имеет блокировку анодного напряжения генераторов. Категорически запрещается дотрагиваться до кнопок блокировки.

3. Для уменьшения СВЧ облучения на выносном стенде для подбора закона возбуждения щелевой антенны чувствительность приемного усилителя делается максимальной и соответственно уменьшается степень возбуждения всей решетки с помощью штырей. Анодное напряжение выносной головки включается только в моменты настройки решетки.

4. При любой возникшей неисправности в стенде немедленно обращаться к дежурному лаборанту либо преподавателю. Категорически запрещается пытаться самостоятельно исправлять возникшие дефекты.

Задание к экспериментальной части.

1. Найти направление максимального излучения $\theta_{\text{гл}}$ и ширину ДН по половинной мощности трех волноводно-щелевых антенн, отличающихся шириной волновода a (макет №2). Исследуемые антенны используются в приемном режиме. Поляризация передающей антенны - вертикальная.

2. Измерить ДН этих трех антенн (макет № 2). Пользуясь декадным делителем, изучить структуру бокового излучения в секторе $\pm 40^\circ$ от главного максимума. При снятии ДН в пределах главного лепестка отсчет углов производить через 2° и результаты заносить в таблицу. В области боковых лепестков допускается запись направлений характерных минимумов и максимумов. После нормировки по максимуму излучения полученные ДН строятся по напряжению в декартовой системе координат.

Замечание. Направление $\theta = 0^\circ$ на стенде соответствует направлению $\theta = \pi/2$ в расчетных моделях антенн (рис. 2.1).

3. Настроить антенну № 1 на равномерное возбуждение в соответствии с методикой, изложенной в п. 2.1. Затем переместить антенну и передающий блок в безэховую камеру и снять ДН настроенной антенны.

4. Сохраняя настройку нечетных щелей антенны № 1, полностью вывернуть винты возбуждения из четных щелей и подстроить еще раз оставшиеся щели, добившись их равномерного возбуждения. Снять диаграмму направленности волноводной решетки при увеличенном расстоянии между щелями, обратив особое внимание на побочные максимумы почти единичного уровня.

5. Произвести настройку антенны № 1 на спадающее к краям амплитудное распределение в соответствии с пунктом 4 расчетного задания. Учесть при этом квадратичность характеристики детектора зонда.

Измерить ширину главного луча по половинной мощности и уровень максимальных боковых лепестков. При измерении УБЛ пользоваться декадным переключателем усилителя.

6. Определить эквивалентные схемы продольной и поперечной щелей, прорезанных в широкой стенке волновода.

2.4. Указания к составлению отчета

Отчет должен содержать:

1. результаты предварительного расчета зависимостей $\theta_{\text{гл}}$, $\Delta\theta_{0,5}$ и УБЛ антенн макетов № 1 и № 2;
2. результаты предварительного расчета диаграмм направленности антенн № 1 и № 2;
3. результаты предварительного расчета амплитуд возбуждения щелевой антенны № 1 для заданной величины Δ ;
4. результаты всех измерений, совмещенные с соответствующими расчетными зависимостями и диаграммами направленности (при этом следует учесть отмеченное выше смещение оси $\theta = 0^\circ$ в эксперименте по отношению к расчетной модели на $\pi/2$);
5. обоснование эквивалентных схем продольной и поперечной щелей, прорезанных в широкой стенке волновода;
6. выводы по работе, сопоставление результатов расчета и эксперимента, анализ экспериментальных результатов.

2.5. Контрольные вопросы

1. Что понимается под идеальным линейным излучателем?
2. Что характеризует коэффициент замедления линейного излучателя?
3. Что такое множитель направленности антенной решетки?
4. Как отличается ширина основного лепестка графика множителя направленности от ширины боковых лепестков в масштабе обобщенной угловой переменной

$$\Psi = [(N kd/2)(\cos\theta - \xi)]?$$

5. Что такое область видимости множителя направленности антенной решетки?
6. Какие параметры антенной решетки влияют на положение главного луча ДН?
7. Какие параметры антенной решетки влияют на ширину главного луча диаграммы направленности?
8. На какие параметры антенной решетки оказывает влияние форма амплитудного распределения?
9. Каковы характерные особенности излучения дискретных линейных антенных решеток по сравнению с непрерывными?
10. Какие существуют способы подавления побочных главных максимумов ДН дискретных линейных антенных решеток?
11. Нарисуйте эпюры распределения амплитуд поверхностных токов волны H_{10} на стенках прямоугольного волновода.
12. Как расположить щели по длине волновода для получения синфазной антенны?
13. Нарисуйте все известные вам типы волноводно-щелевых антенн.

14. В чем сходство и различие резонансных и нерезонансных волноводных щелевых решеток?

15. Как изменяется диаграмма направленности нерезонансной щелевой волноводной решетки при изменении длины волны?

16. Как изменяется диаграмма направленности нерезонансной щелевой волноводной решетки при изменении фазовой скорости в волноводе?

17. При каких условиях в нормированной диаграмме направленности щелевой волноводной решетки могут получиться побочные максимумы почти единичного уровня?

18. Какими способами можно избежать появления в волноводной щелевой решетке побочных максимумов почти единичного уровня?

19. Почему в нерезонансных щелевых волноводных решетках обычно избегают расположения щелей на расстояниях, равных $\lambda_v/2$ или λ_v ?

20. Какими способами можно регулировать входную проводимость продольных щелей и входное сопротивление поперечных щелей в волноводе?

21. Как должна меняться проводимость продольных щелей и сопротивление поперечных щелей в нерезонансной волноводной решетке для обеспечения их равномерного возбуждения?

22. Из каких соображений выбираются длины щелей в волноводных нерезонансных решетках?

23. Как расположить элементарную крестообразную щель на широкой стенке волновода для получения излучения с круговой поляризацией?

24. Как меняется степень возбуждения продольной (поперечной) щели в зависимости от расстояния между центром щели и короткозамыкающим поршнем?

25. Какие меры предприняты в данной лабораторной работе для снижения излучения СВЧ сигнала?

26. Каким образом осуществляется настройка волноводной щелевой антенны на заданное амплитудное возбуждение?

27. Каким образом экспериментально оценивается УБЛ диаграммы направленности исследуемых антенн?

ЛИТЕРАТУРА

1. Дуплѐнков Д.А., Попереченко Б.А., Серѐгина А.Р. Методы формирования поля излучения. - М.: Моск. энерг. ин-т, 1987. С.70-86.

2. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. - М.: Энергия, 1975. С.201-207, 217-219, 237-245, 358-366.

3. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. - М.: Высшая школа, 1988. С.275-278, 283-284, 292-296, 310-316.