

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

Лабораторная работа № 3.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИРЕКТОРНОЙ АНТЕННЫ

Работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИРЕКТОРНОЙ АНТЕННЫ

Цель работы

1. Изучить принцип действия директорной антенны.
2. Получить навык расчета токов в простейших антеннах на основе метода наведенных ЭДС либо с использованием известных данных по взаимному сопротивлению.
3. Получить навык теоретического расчета и экспериментального измерения ДН директорной антенны.

Теоретическая подготовка к работе

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

- изучить теоретический материал и проверить знания по контрольным вопросам, имеющимся в конце описания лабораторной работы. Минимально необходимый для выполнения лабораторной работы материал по теории многовибраторных антенн изложен ниже. Аналогичный материал можно найти в лекциях по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны», а также в [1,2];
- изучить определение характеристик направленности антенн (Приложение А);
- ознакомиться с принципами работы симметрирующего устройства «У-колено»;
- внимательно ознакомиться с описанием лабораторной установки, предстоящими измерениями и требованиями к оформлению отчета. После этого необходимо подготовить шаблон будущего отчета с записью этапов работы и необходимых пояснений;
- выполнить расчетное задание.

Директорная антенна представляет собой ряд вибраторных антенн, расположенных параллельно в одной плоскости (рис. 3.1). Одна из

вibratorных антенн (вibrator) возбуждается фидерной линией и является активной, остальные – пассивными. Пассивный vibrator, расположенный позади активного, играет роль рефлектора, т.е. уменьшает интенсивность излучения в обратном направлении. Остальные пассивные vibratorы располагаются впереди активного vibratorа и играют роль директоров (усиливают поле излучения в направлении «активный vibrator – директор»).

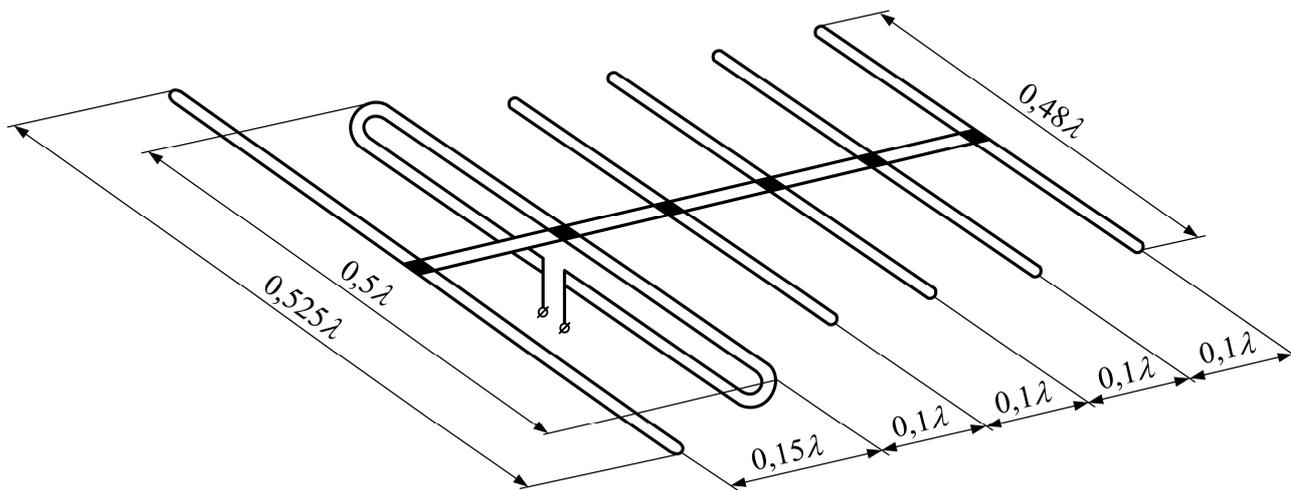


Рис. 3.1. Директорная антенна

Для получения максимального коэффициента направленного действия (КНД) директорной антенны на заданной частоте длина vibratorов и расстояние между ними подбираются так, чтобы соотношения между амплитудами и фазами токов на vibratorах были такими же, как если бы они возбуждались бегущей волной тока с замедленной фазовой скоростью. Настройка директорной антенны оказывается весьма чувствительной к изменению частоты, поэтому антенна является узкополосной (рабочая полоса частот составляет несколько процентов).

Обычно при оптимальной настройке директорной антенны входное сопротивление активного vibratorа оказывается в 3...4 раза ниже собственного активного сопротивления одиночного vibratorа, что существенно затрудняет его согласование с фидерной коаксиальной линией стандартного волнового сопротивления (75 Ом). Поэтому в качестве активного

вibratorа директорной антенны часто используют петлевой вибратор Пистолькорса (рис. 3.2), имеющий входное сопротивление в составе директорной антенны, близкое к величине 75 Ом.

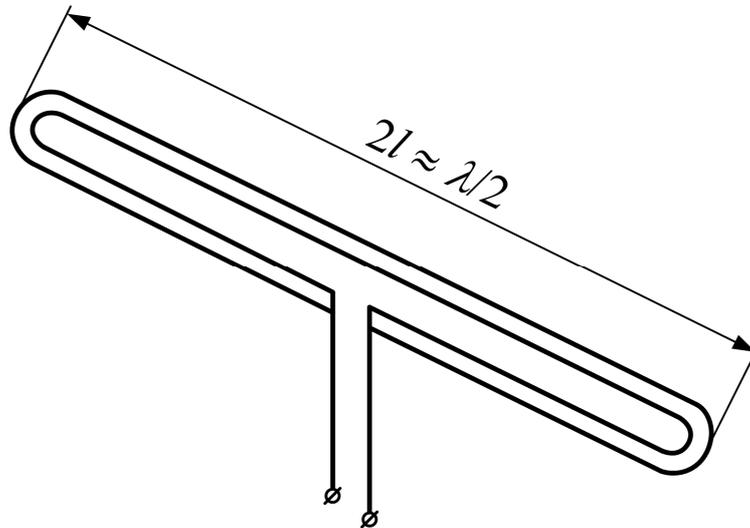


Рис. 3.2. Петлевой вибратор Пистолькорса

Нумерация вибраторов идет от рефлектора, в роли которого выступает самый длинный вибратор. При фиксированных положении и длине каждого из вибраторов директорной антенны комплексные амплитуды токов, возбуждаемые в них, определяются методом наведенных ЭДС, согласно которому можно записать систему уравнений

$$\begin{cases} Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + \dots + Z_{1N}I_N = 0, \\ Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + \dots + Z_{2N}I_N = U_2, \\ \vdots \\ Z_{N1}I_1 + Z_{N2}I_2 + \dots + Z_{NN}I_N = 0, \end{cases} \quad (3.1)$$

где I_n – комплексная амплитуда тока на входе n -го вибратора; Z_{nn} – собственное сопротивление n -го вибратора; $Z_{nn'}$ – взаимное сопротивление между вибраторами с номерами n и n' ; N – число вибраторов в директорной антенне; U_2 – напряжение, подводимое ко входу активного вибратора.

Система уравнений (3.1) соответствует случаю возбуждения второго (активного) вибратора директорной антенны напряжением U_2 . Согласно теории связанных вибраторных антенн собственное сопротивление симметричного вибратора зависит от его геометрических размеров (длины плеч и толщины), а

взаимное сопротивление – от расстояния между вибраторами и соотношения их геометрических размеров.

Рассмотрим частный случай, когда два симметричных вибратора, представляющих собой цилиндрические металлические стержни радиусом a и длиной $2l_n$ и $2l'_n$, расположены в плоскости YOZ параллельно оси OZ на расстоянии d один относительно другого (рис. 3.3). Предположим, что $a \ll \lambda$, а $d \gg a$. Тогда распределение тока вдоль вибратора в первом приближении имеет одну z -ю составляющую и подчиняется синусоидальному закону:

$$I_{zn}(z) = I_n \frac{\sin[k(l_n - |z|)]}{\sin(kl_n)}, \quad (3.2)$$

$$I_{zn'}(z) = I_{n'} \frac{\sin[k(l'_n - |z|)]}{\sin(kl'_n)}, \quad (3.3)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

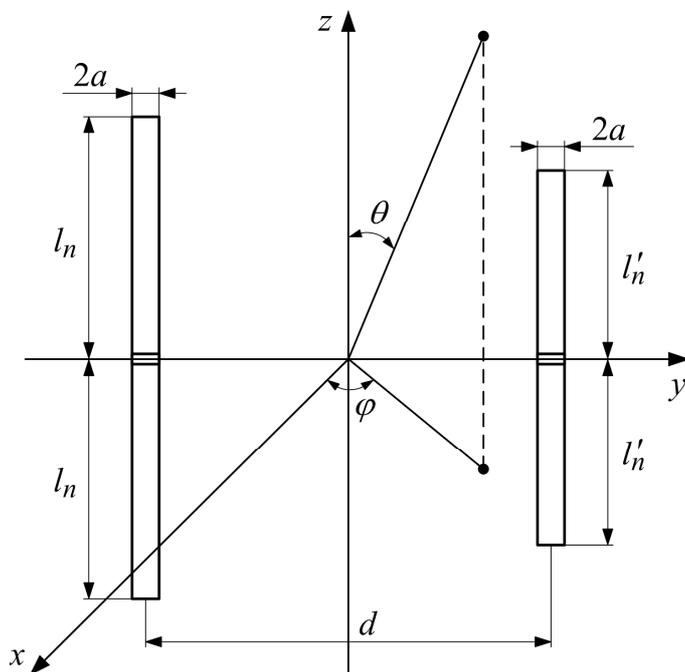


Рис. 3.3. Расположение вибраторов друг относительно друга

Система из двух вибраторов может быть представлена эквивалентным четырехполосником, поскольку подключение источника возбуждения к входу одного вибратора вызывает появление тока и напряжения на входе второго; в

рассматриваемой конструкции директорной антенны входы всех пассивных вибраторов закорочены. В соответствии со сказанным электрическая схема четырехполюсника, отображающая систему из двух вибраторов с закороченной первой клеммной парой, изображена на рис. 3.4.

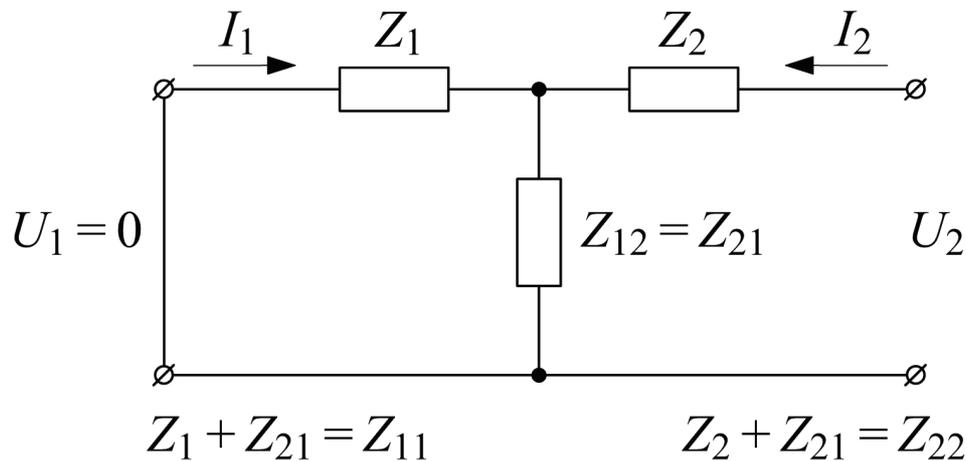


Рис. 3.4. Электрическая схема четырехполюсника, отображающая систему из двух вибраторов с закороченной первой клеммной парой

Записывая систему уравнений (3.1) для случая двух вибраторов, получаем

$$\begin{cases} Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 = 0, \\ Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 = U_2. \end{cases} \quad (3.4)$$

Сопротивления Z_{11} и Z_{22} являются собственными сопротивлениями первого и второго вибраторов. С учетом этого входное сопротивление второго вибратора можно записать как

$$Z_{\text{вх}2} = \frac{U_2}{I_2} = Z_{21} \frac{I_1}{I_2} + Z_{22}. \quad (3.5)$$

Из (3.5) следует, что для случая двух вибраторов входное сопротивление второго вибратора, находящегося рядом с первым, отличается от собственного на дополнительное сопротивление $Z_{21} \frac{I_1}{I_2}$, которое называется внесенным или наведенным (со стороны первого вибратора).

Решение системы уравнений (3.1) позволяет определить амплитуды токов на вибраторах и характеристики излучения директорной антенны. При этом

величины собственных (Z_{nn}) и взаимных ($Z_{nn'}$) сопротивлений считаются известными.

В соответствии с методом наведенных ЭДС собственное сопротивление n -го вибратора определяется как

$$Z_{nn} = -\frac{2}{|I_n|^2} \int_0^{l_n} E_{Z_{nn}}(z) I_{Z_n}^*(z) dz, \quad (3.6)$$

где
$$E_{Z_{nn}}(z) = -\frac{jWI_n}{4\pi \sin(kl_n)} \left\{ \frac{\exp(-jkR_1)}{R_1} + \frac{\exp(-jkR_2)}{R_2} - 2\cos(kl_n) \frac{\exp(-jkR_0)}{R_0} \right\};$$

$R_0 = \sqrt{a^2 + z^2}$; $R_1 = \sqrt{a^2 + (z - l_n)^2}$; $R_2 = \sqrt{a^2 + (z + l_n)^2}$; $W = 120\pi \approx 377$ Ом – волновое сопротивление свободного пространства.

Аналогично взаимное (вносимое) сопротивление вибраторов рассчитывается по формуле

$$Z_{nn'} = -\frac{2}{I_n^* I_{n'}} \int_0^{l_n} E_{Z_{nn'}}(z) I_{Z_n}^*(z) dz, \quad (3.7)$$

где
$$E_{Z_{nn'}}(z) = -\frac{jWI_{n'}}{4\pi \sin(kl_{n'})} \left\{ \frac{\exp(-jkr_1)}{r_1} + \frac{\exp(-jkr_2)}{r_2} - 2\cos(kl_{n'}) \frac{\exp(-jkr_0)}{r_0} \right\};$$

$r_0 = \sqrt{d^2 + z^2}$; $r_1 = \sqrt{d^2 + (z - l_{n'})^2}$; $r_2 = \sqrt{d^2 + (z + l_{n'})^2}$.

Для взаимных сред в силу теоремы взаимности справедливо равенство $Z_{nn'} = Z_{n'n}$. При расчете собственных и взаимных сопротивлений вибраторов по формулам (3.6) и (3.7) обычно используются алгоритмы численного интегрирования.

При достаточно больших расстояниях между вибраторами ($d > 3 \dots 5\lambda$) модуль взаимного сопротивления обратно пропорционален величине d , а его фаза изменяется по закону $\arg(Z_{nn'}) \approx kd$.

На рис. 3.5 показана зависимость активной R_{nn} и реактивной X_{nn} частей собственного сопротивления n -го вибратора от его длины. Изменение взаимного сопротивления вибраторов представлено на рис. 3.6 и 3.7: на рис. 3.6 – графики составляющих этого сопротивления для полуволновых вибраторов в

зависимости от расстояния между ними, а на рис. 3.7 – аналогичные графики для вибраторов различной длины.

Для расчета направленных свойств многовибраторной антенны и ее входного сопротивления можно воспользоваться не абсолютными значениями токов, а относительными. В качестве исходного тока можно взять ток, например, второго вибратора. Поэтому в случае двухвибраторной антенны ток на пассивном вибраторе можно определить из (3.4):

$$I_1 = -\frac{Z_{12}}{Z_{11}} I_2. \quad (3.8)$$

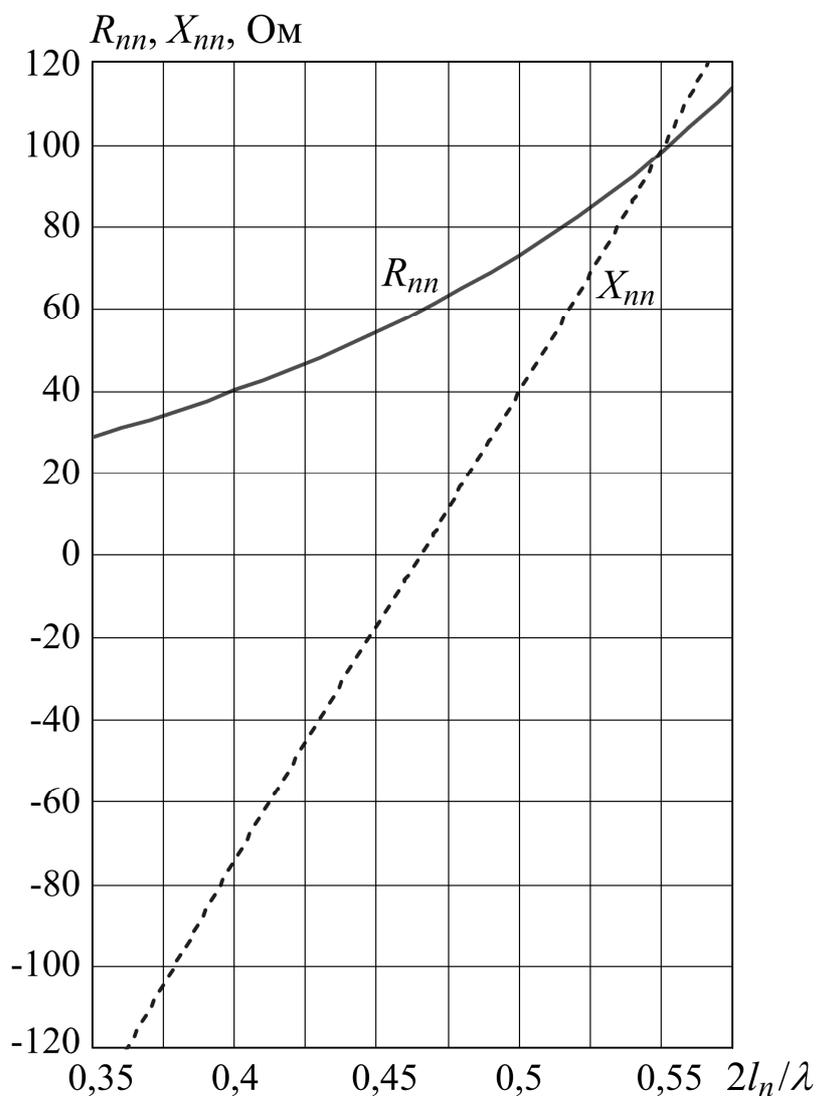


Рис. 3.5. Зависимость активной R_{nn} и реактивной X_{nn} частей собственного сопротивления n -го вибратора от его длины

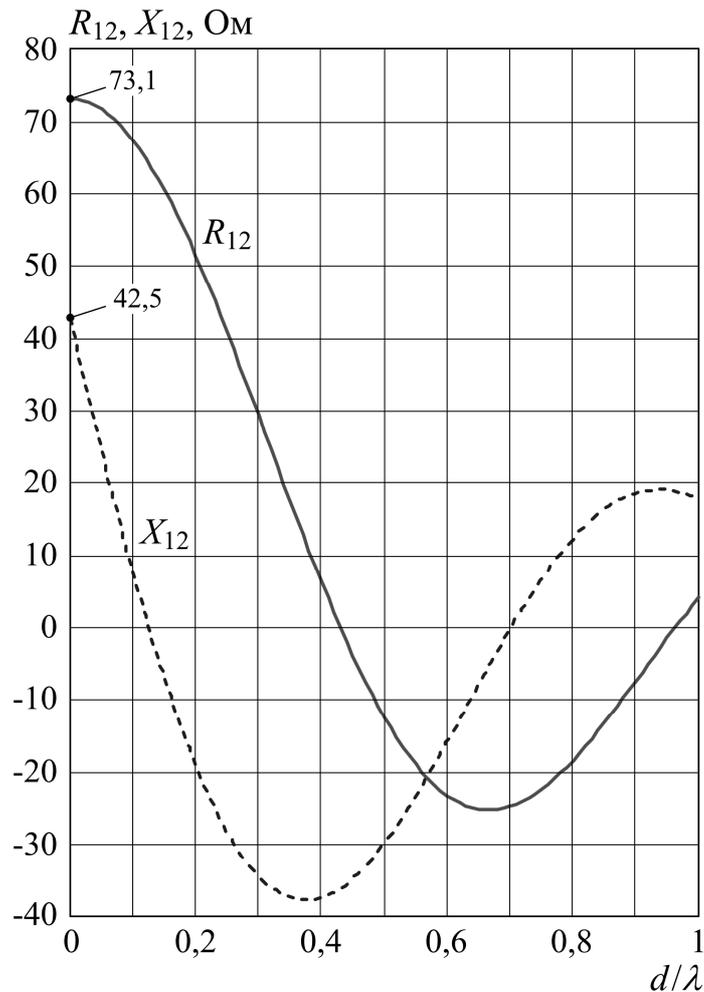


Рис. 3.6. Зависимость активной R_{12} (сплошная линия) и реактивной X_{12} (пунктирная линия) частей взаимного сопротивления полуволновых вибраторов от расстояния между ними

Диаграмма направленности излучающей системы из N параллельных вибраторов разной длины, расположенных вдоль оси Oy , имеет вид

$$f(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N I_n f_n(\theta, \varphi) \exp(jky_n \sin\theta \sin\varphi), \quad (3.9)$$

где $f_n(\theta, \varphi)$ – ДН n -го вибратора; y_n – координата n -го вибратора; θ, φ – углы сферической системы координат.

В общем случае под $f_n(\theta, \varphi)$ понимается ДН n -го вибратора в составе директорной антенны при условии, что все остальные вибраторы разомкнуты. Однако в приближении метода наведенных ЭДС, когда распределение тока вдоль вибратора аппроксимируется функцией (3.2), в качестве $f_n(\theta, \varphi)$ можно

использовать ДН уединенного вибратора, для расчета которой в двух главных плоскостях воспользуемся соотношениями:

для плоскости xOy ($\theta = 90^\circ$, H -плоскость вибратора)

$$f(\varphi) = \sum_{n=1}^N I_n \exp(jky_n \sin\varphi), \quad (3.10)$$

для плоскости yOz ($\varphi = 90^\circ$, E -плоскость вибратора)

$$f(\theta) = \sum_{n=1}^N I_n \frac{\cos(kl_n \cos\theta) - \cos(kl_n)}{\sin\theta \sin(kl_n)} \exp(jky_n \sin\theta). \quad (3.11)$$

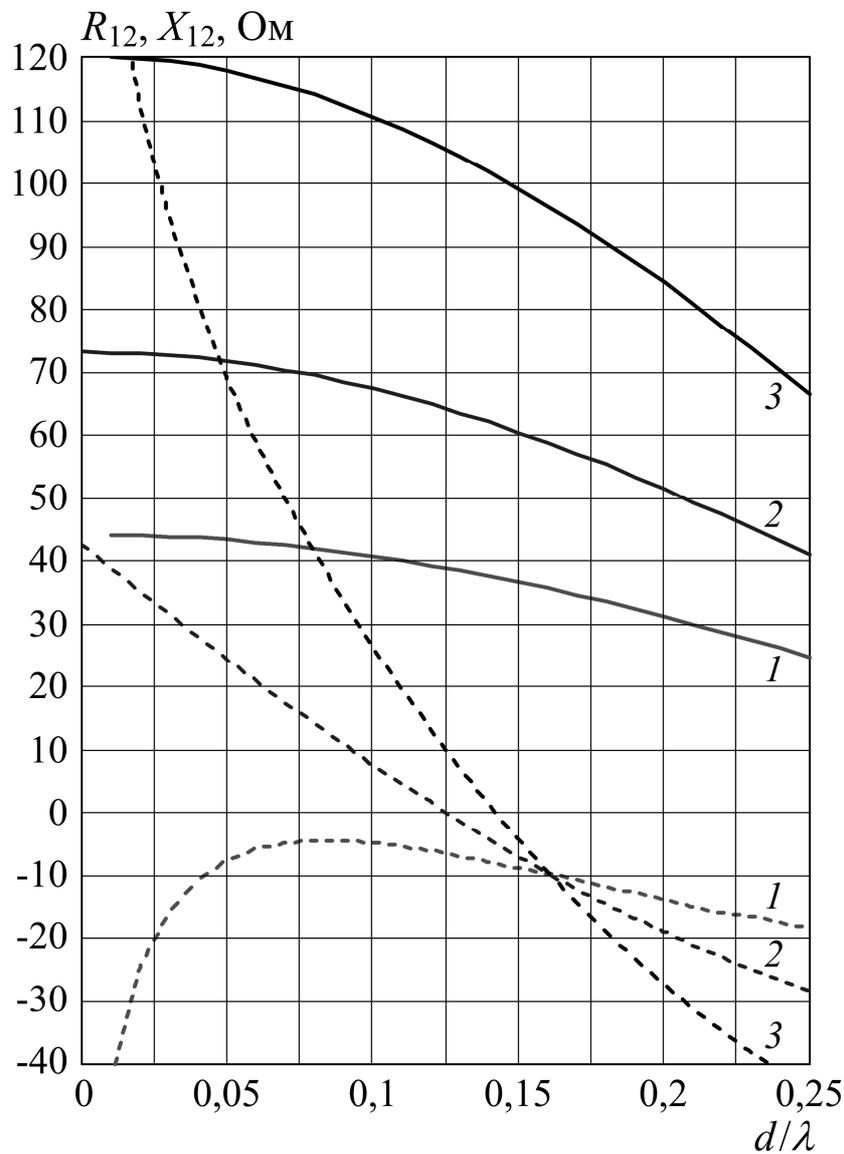


Рис. 3.7. Зависимость активной R_{12} (сплошная линия) и реактивной X_{12} (пунктирная линия) частей взаимного сопротивления вибраторов длиной $2l$ от расстояния между ними: 1 – $2l=0,416\lambda$; 2 – $2l=0,5\lambda$; 3 – $2l=0,584\lambda$

Коэффициент направленного действия (КНД) директорной антенны определяется соотношением [5]

$$D = \frac{2\pi R |E_{\max}|^2}{WP_{\Sigma}}, \quad (3.12)$$

где $|E_{\max}|$ – модуль напряженности электрического поля в направлении максимального излучения в точке наблюдения, расположенной от антенны на расстоянии R (в дальней зоне антенны); P_{Σ} – мощность излучения антенны.

После преобразований формулу (3.12) можно привести к виду, удобному для вычислений на компьютере:

$$D = \frac{120 |f(\theta_{\max}, \varphi_{\max})|^2}{\operatorname{Re}(U_2 I_2^*)}, \quad (3.13)$$

где $\theta_{\max}, \varphi_{\max}$ – направление максимального излучения директорной антенны; U_2 и I_2 – амплитуды напряжения и тока на активном вибраторе.

Для упрощения расчетов можно считать, что ДН директорной антенны имеет осевую симметрию относительно оси Oy (см. рис. 3.3). В этом случае КНД директорной антенны определяется по соотношению

$$D = \frac{2}{\int_0^{\pi} f^2(\psi) \sin \psi d\psi}, \quad (3.14)$$

удобному для расчетов графическим способом. В формуле (3.14) ψ – угол, отсчитываемый от оси Oy .

На рис. 3.8 показана ДН идеализированной двухвибраторной антенны в H -плоскости (может быть рассчитана с использованием выражения (3.10)). Идеализация здесь заключена в том, что токи в вибраторах одинаковы по амплитуде и сдвинуты по фазе на $\pi/2$.

На рис. 3.9 представлена ДН этой же антенны в E -плоскости вибраторов (может быть рассчитана с использованием выражения (3.11)). Анализ соотношений (3.10), (3.11) и рис. 3.8, 3.9 показывает, что диаграмма множителя решетки симметрична относительно линии расположения излучателей.

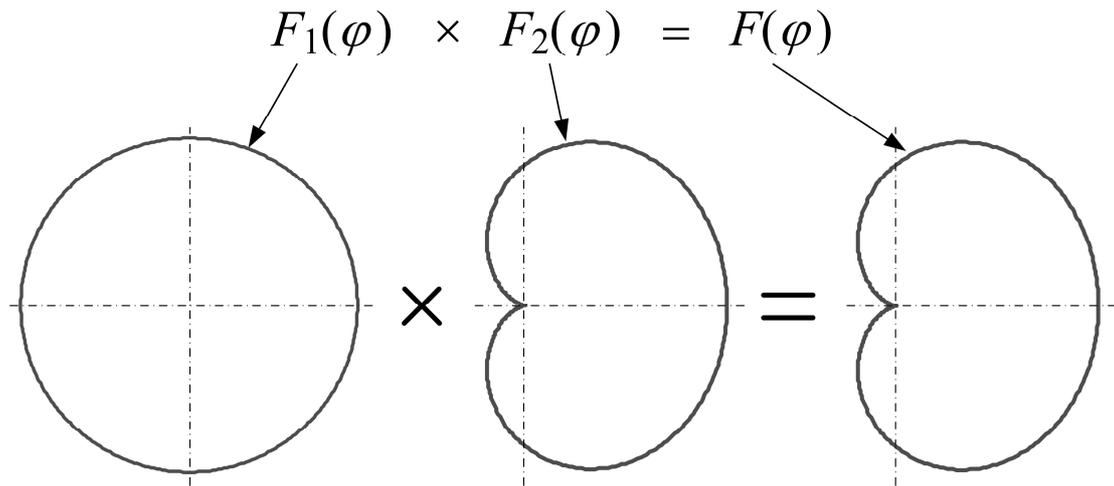


Рис. 3.8. ДН идеализированной двухвibratorной антенны в H -плоскости:

$F_1(\varphi)$ – ДН вибратора; $F_2(\varphi)$ – множитель решетки

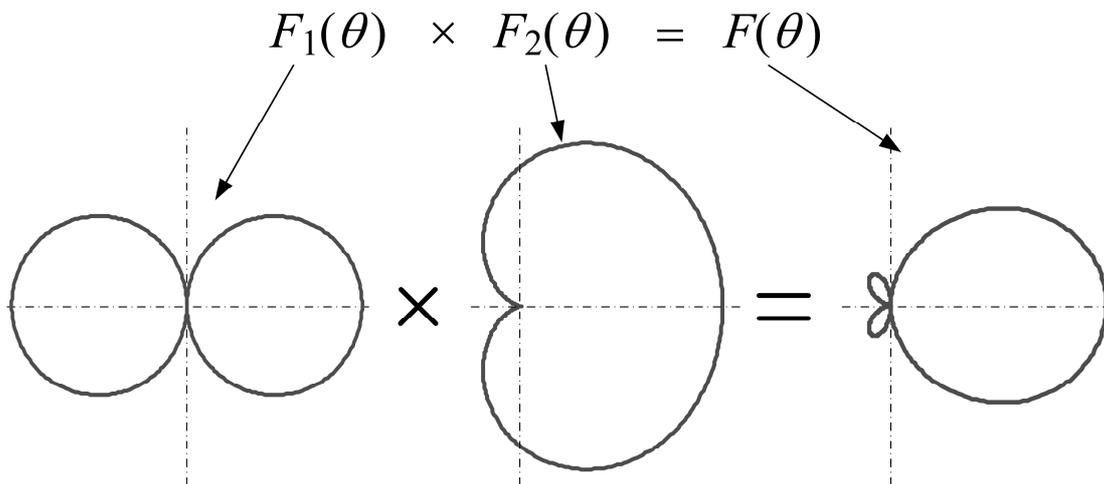


Рис. 3.9. ДН идеализированной двухвibratorной антенны в E -плоскости:

$F_1(\theta)$ – ДН вибратора; $F_2(\theta)$ – множитель решетки

В случае реальной антенны токи в ее вибраторах не будут одинаковыми по амплитуде, а их взаимная фазировка не будет соответствовать необходимой (т.е. при $d=\lambda/4$ $I_{n+1}/I_n \neq e^{-j\frac{\pi}{2}}$). В частности, ненормированная ДН в H -плоскости двухвibratorной антенны рассчитывается по соотношению

$$f(\varphi) = I_1 + I_2 \exp(jkd \sin \varphi), \quad (3.15)$$

где d – расстояние между вибраторами.

Для проведения исследований изменения формы ДН двухвibratorной антенны в H -плоскости в зависимости от расстояния между вибраторами d , отношения амплитуд токов $|I_1|/|I_2|$ и сдвига фаз между токами на вибраторах β формулу (3.15) можно записать в виде

$$f(\varphi) = |I_2| \left\{ \frac{|I_1|}{|I_2|} + \exp[j(kd \sin \varphi + \beta)] \right\}. \quad (3.16)$$

Расчетные задания и расчетные формулы

Исходные данные для расчета на каждую бригаду студентов в зависимости от выполняемого варианта лабораторной работы приведены в табл. 3.1, где $2l_1$ – длина пассивного вибратора; $2l_2$ – длина активного вибратора; d – расстояние между вибраторами; λ – длина волны. Диаметр обоих вибраторов составляет 6 мм, и при указанной в табл. 3.1 длине их волновое сопротивление имеет величину около 300 Ом.

Таблица 3.1. Исходные данные для расчета

Параметры антенны	Номер варианта								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
λ , см	32	33	34	35	30	31	32	33	34
d , см	4,6	5,5	6,2	6,9	2,8	3,8	4,6	5,5	6,2
$2l_1$, см	13	13,7	14,4	14,4	17	17	18,2	17,3	18,1
$2l_2$, см	16,7	17,2	18,3	19	14,4	14,9	15,3	15,6	16,2

1. Рассчитать ДН двухвibratorной антенны в E - и H -плоскостях.

Сначала рассчитывают ток I_1 по формуле (3.8), полагая, что $I_2=1$, а собственные и взаимные сопротивления вибраторов определяются по (3.6) и (3.7) или по графикам: собственные сопротивления – по графикам на рис. 3.5; взаимные сопротивления – по графикам на рис. 3.10, где цифрами обозначены кривые, рассчитанные для соответствующих номеров вариантов из табл. 3.1.

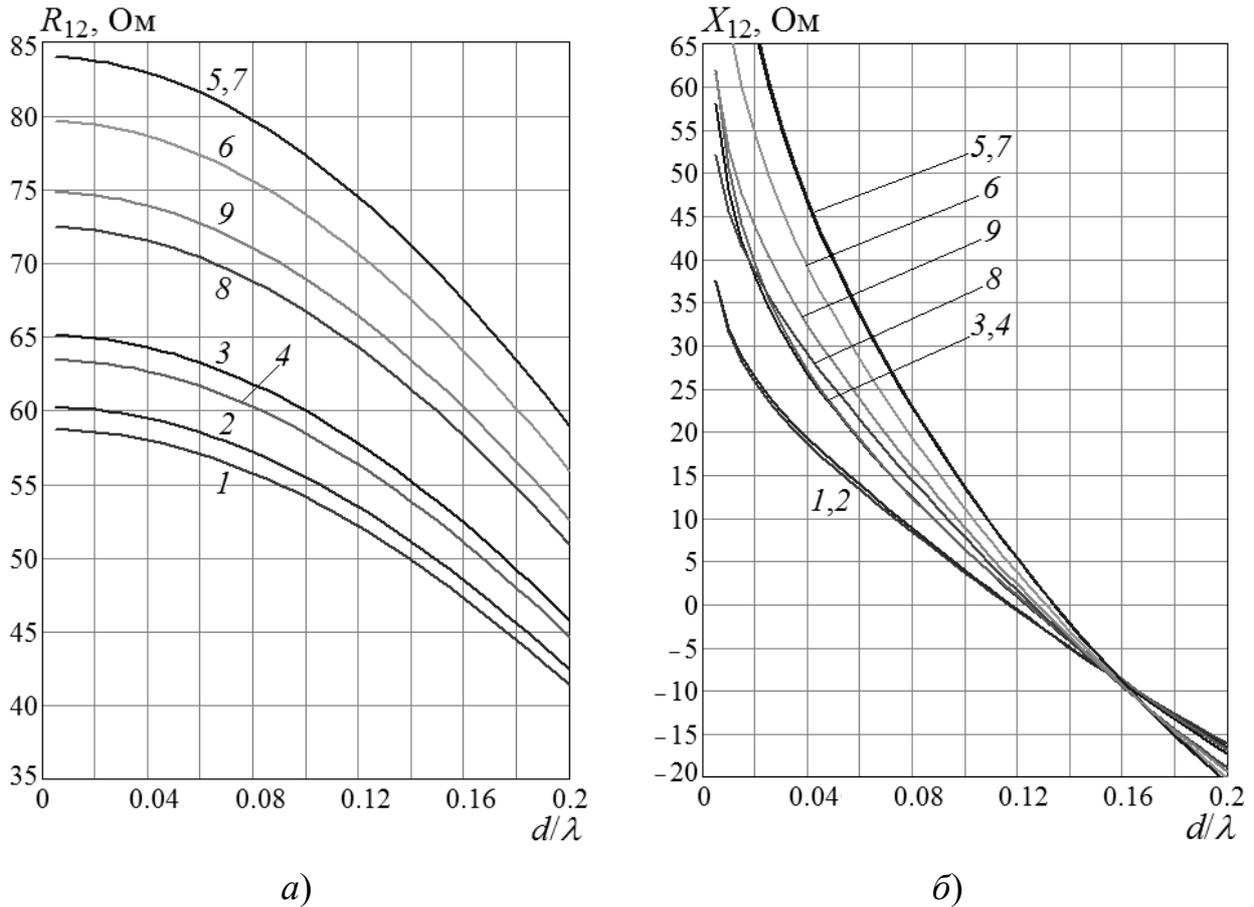


Рис. 3.10. Зависимость активной R_{12} (а) и реактивной X_{12} (б) частей взаимного сопротивления вибраторов различной длины от расстояния между ними:

Далее по (3.10) и (3.11) находят ненормированные ДН в H - и E -плоскостях соответственно.

Затем рассчитывают ДН двухвибраторной антенны при изменении параметров d и $2l_1$ на $\pm 6\%$.

2. Исследовать ДН двухвибраторной антенны в H -плоскости в приближении заданного отношения амплитуд и фаз токов на вибраторах.

Для этого рассчитывают и строят ненормированные ДН двухвибраторной антенны в H -плоскости по (3.16) в зависимости от трех параметров:

- 1) расстояния между вибраторами $d = \lambda/8; \lambda/4; 3\lambda/8; \lambda/2$ для $|I_1|/|I_2|=1; \beta = -90^\circ$;
- 2) отношения амплитуд токов $|I_1|/|I_2| = 1; 0,75; 0,5; 0,25$ для $d = \lambda/4, \beta = -90^\circ$;

3) сдвига фаз между токами на вибраторах $\beta = 0^\circ; -30^\circ; -60^\circ; -90^\circ$ для $d = \lambda/4; |I_1|/|I_2|=1$.

Путем визуального сопоставления ДН определить случаи с наименьшим излучением в обратном направлении по каждому из трех указанных параметров.

Экспериментальная часть

Описание установки и ее схема

Лабораторная установка (рис. 3.11) состоит из стойки (рис. 3.12), привинченной к полу, на которой установлена исследуемая антенна; передающего шлейф-вибратора, укрепленного на стене; измерительных генератора и милливольтметра ВЗ-38. Направленные свойства исследуемой директорной антенны определяются в режиме приема.

Для устранения влияния других аналогичных установок выход исследуемой антенны через коаксиальный кабель нагружен на частотный фильтр в виде высокочастотного резонатора. Резонатор содержит кристаллический детектор, сигнал с которого подается на вход милливольтметра ВЗ-38. Вследствие нелинейной характеристики детектора показания ВЗ-38 пропорциональны примерно второй степени напряженности измеряемого поля антенны. Измерительный генератор выдает напряжение высокой частоты, промодулированное меандром с частотой 1 кГц.

Внешний вид двухвибраторной антенны показан на рис. 3.12. Пассивный вибратор, который удерживается фиксатором, может находиться в любом из трех отверстий «стрелы». К каждой установке прилагаются три пассивных вибратора различной длины: длина среднего соответствует длине пассивного вибратора, указанной в расчетном задании, а длины двух других вибраторов отличаются от расчетной примерно на 6%. Расстояние (в миллиметрах) от центра пассивного вибратора до центра активного вибратора указано цифрами над каждым из трех отверстий. Пассивный вибратор может быть удален из

«стрелы» или вставлен в нее при приложении небольшого усилия, направленного вдоль его оси. Активный вибратор выполнен в виде шлейф-вибратора для получения лучшего согласования с кабелем питания за счет увеличения его входного сопротивления. Симметрирующий переход от коаксиального кабеля ко входу антенны выполнен в виде «U-колена». Антенна закреплена в головке с лимбом, позволяющим поворачивать ее в горизонтальной плоскости и снимать в этой плоскости ДН.

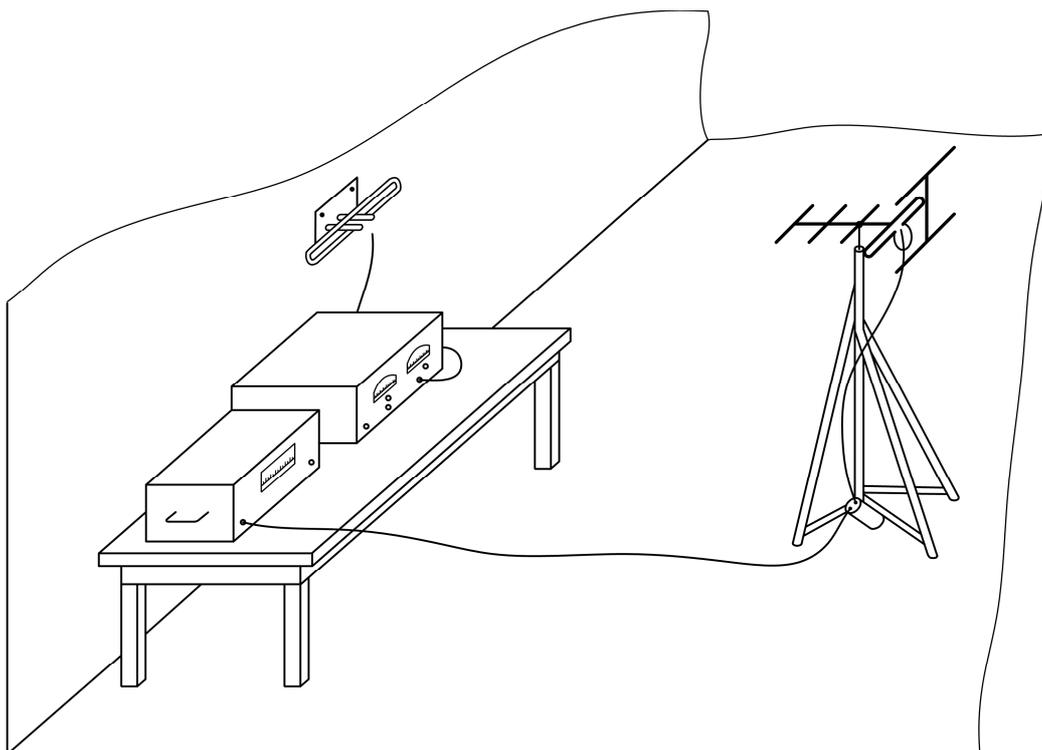


Рис. 3.11. Схема лабораторной установки

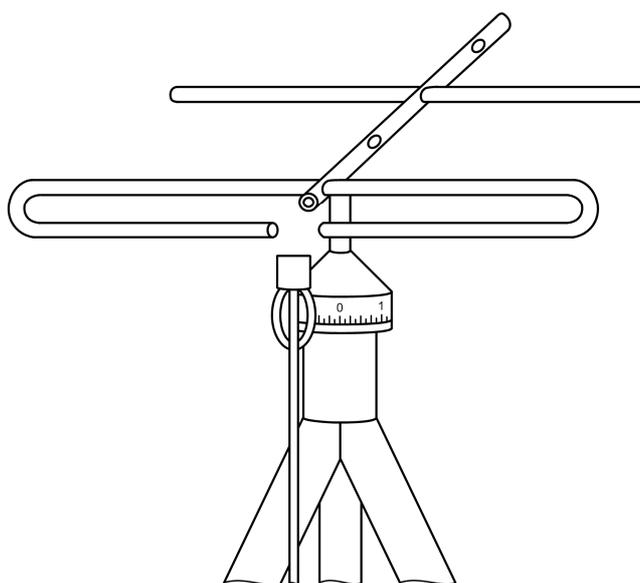


Рис. 3.12. Внешний вид директорной двухвибраторной антенны

Кроме двухвibratorной антенны на стойке стенда может быть также установлен неразборный макет телевизионной антенны, в котором вибраторы «жестко» закреплены, например, путем пайки. Электрическая схема лабораторной установки приведена на рис. 3.13.

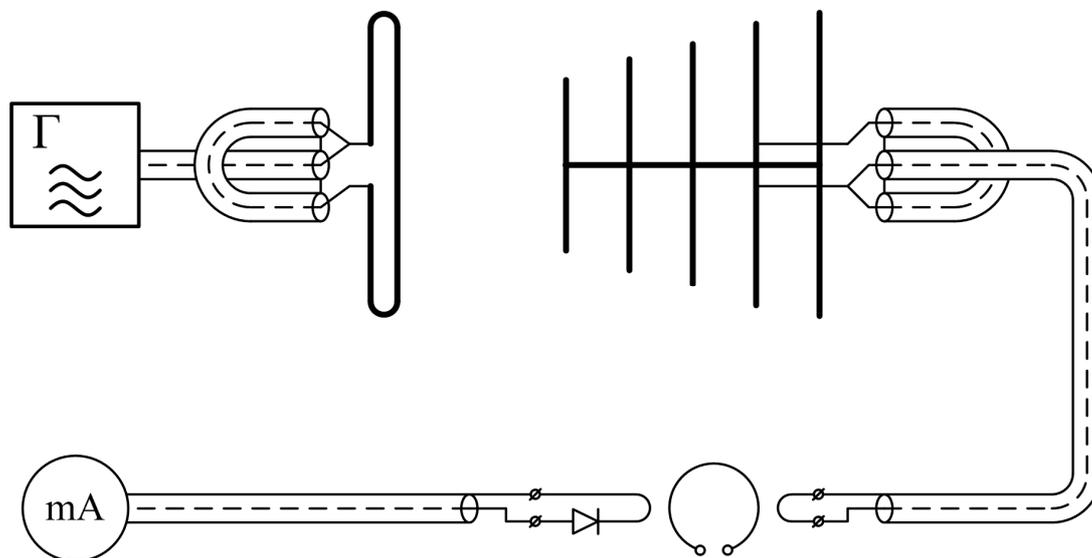


Рис. 3.13. Электрическая схема лабораторной установки

Порядок выполнения эксперимента

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

1. Снять ДН двухвibratorной антенны.

На стойке стенда устанавливают двухвibratorную антенну; вилку кабеля антенны соединяют с розеткой резонатора. В среднем отверстии «стрелы» антенны закрепляют пассивный вибратор, имеющий длину в соответствии с заданием (средний по длине из трех имеющихся в установке). Вращая антенну в горизонтальной плоскости, добиваются максимальных показаний на ВЗ-38. Зафиксировав это угловое положение антенны как начальное (нулевое), снимают ДН через каждые 10° в пределах от 0° до 180° (данные для второй половины ДН вследствие ее симметрии можно не определять) и заносят в табл. 3.2. Полученные данные необходимо обработать – извлечь квадратный корень

и пронормировать. После этого экспериментальную ДН строят в тех же координатах, что и теоретическую.

Таблица 3.2. Экспериментальные данные измерения ДН двухвибраторной антенны в горизонтальной плоскости

φ , град	0	10	20	30	40	50	60	...	180
$ f^2(\varphi) $									
$ f(\varphi) $									
$ F_{\text{норм}}(\varphi) $									

2. Исследовать влияние расстояния между вибраторами на интенсивность потока мощности в направлении максимума излучения двухвибраторной антенны.

Исследование влияния расстояния между вибраторами на интенсивность потока мощности в направлении максимума излучения двухвибраторной антенны производят путем установки вибратора средней длины поочередно в каждое из трех отверстий «стрелы». Для этих трех положений вибратора записывают показания прибора для двух направлений «стрелы» антенны: 0° и 180° . Затем по трем точкам строят график отношения интенсивности потока мощности в направлении максимума излучения к интенсивности потока мощности в противоположном направлении: $P_0/P_{180} = \alpha_0/\alpha_{180}$, где α – показания прибора в направлении 0° и 180° , в зависимости от относительного расстояния между вибраторами d/λ .

3. Исследовать влияние длины пассивного вибратора на интенсивность потока мощности в направлении максимума излучения двухвибраторной антенны.

Исследование влияния длины пассивного вибратора на интенсивность потока мощности в направлении максимума излучения двухвибраторной антенны производят путем поочередной установки в среднее отверстие

«стрелы» антенны вместо вибратора расчетной (средней) длины двух вибраторов, отличающихся по длине от расчетного примерно на 6%. Показания прибора для всех трех вибраторов записывают для двух положений антенны: 0° и 180° . Далее на отдельном графике по трем точкам строят график отношения интенсивности потоков мощности $P_0/P_{180} = \alpha_0/\alpha_{180}$ в зависимости от относительной длины пассивного вибратора $2l_1/\lambda$.

Экспериментальные зависимости P_0/P_{180} от расстояния между вибраторами d/λ (п. 2) и длины пассивного вибратора $2l_1/\lambda$ (п. 3) сравниваются с аналогичными зависимостями, полученными в расчетной части домашнего задания.

4. Снять ДН макета директорной приемной антенны и вычислить ее коэффициент направленного действия.

На стойке стенда устанавливают макет приемной директорной антенны и снимают ДН в горизонтальной плоскости через каждые 5° в секторе углов $0^\circ \dots 90^\circ$. В секторе углов $90^\circ \dots 180^\circ$ проверяют наличие лепестков, которые отмечают, если их интенсивность составит заметную долю от интенсивности в главном направлении (порядка 1...2%). Данные заносят в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Экспериментальные данные измерения ДН директорной приемной антенны в горизонтальной плоскости

φ , град	0	5	10	15	20	25	30	...	90	...
$ f^2(\varphi) $										
$ f(\varphi) $										
$ F_{\text{норм}}(\varphi) $										

Полученные данные нормируют, и на отдельном рисунке в прямоугольной системе координат строят ДН «по мощности», которую используют для определения КНД по (3.14). Интегрирование в этой формуле проще всего выполнить графическим путем. Для этого на рисунке рядом с ДН «по

мощности» в нашем случае строят график функции $f^2(\varphi)\sin\varphi$ и подсчитывают величину площади S_F , ограниченную построенной кривой и осью φ (рис. 3.14).

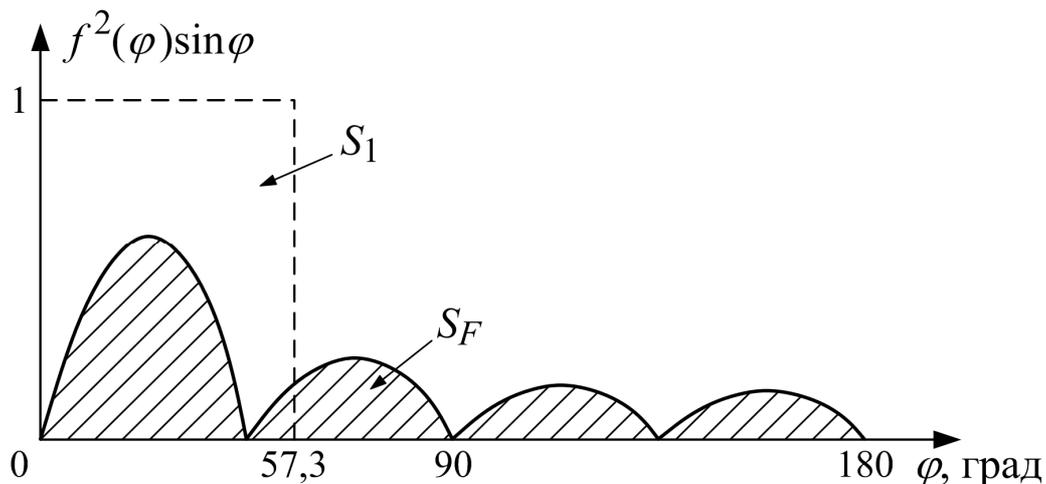


Рис. 3.14. Для экспериментального определения КНД

В формулу (3.14) подставляют относительное значение площади

$$\int_0^{\pi} f^2(\varphi)\sin\varphi d\varphi = S_F/S_1, \text{ где } S_1 - \text{величина единичной площади (прямоугольник}$$

величиной $1 \times 57,3^\circ$) в тех же единицах измерения, что и S_F . Полученное значение КНД сравнивают с теоретическим, полученным при расчете домашнего задания.

Вторую ДН «по полю» после извлечения из нормированных данных квадратного корня строят в тех же координатах, что и теоретическую.

Требования к отчету

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

- 1) цель работы и электрическая схема лабораторной установки (рис. 3.13);
- 2) результаты выполнения расчетного задания;
- 3) таблицы с данными экспериментальных измерений;
- 4) рисунки с графиками характеристик исследуемых антенн;
- 5) результаты определения КНД макета директорной антенны;
- 6) выводы по каждому пункту работы и всей работе в целом.

Контрольные вопросы

1. Что такое собственное сопротивление вибратора и от каких параметров оно зависит? Чему равно собственное сопротивление вибратора длиной $\lambda/2$? Какие изменения произойдут в собственном сопротивлении полуволнового вибратора при его укорочении или удлинении?
2. Что такое взаимное сопротивление двух вибраторов? От чего зависит эта величина? Изобразите графически изменение взаимного сопротивления от расстояния между вибраторами в пределах $d = 0 \dots \lambda/2$.
3. Чем отличается наведенное (вносимое) сопротивление от взаимного?
4. В чем заключается принцип работы директорной антенны?
5. Каковы графики ДН в трех взаимно перпендикулярных плоскостях двух одинаково ориентированных полуволновых вибраторов, расположенных друг от друга на расстоянии $\lambda/4$, с токами равной амплитуды, но со сдвигом по фазе в 90° ?
6. Каковы ориентировочно расстояния между вибраторами и длины вибраторов в директорной антенне? Чем ограничен КНД директорной антенны?
7. Какой применяется метод расчета токов в вибраторах антенны и какие величины для этого необходимо знать?

Приложение А. 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

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

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 ДН.

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

Довольно часто при построении ДН 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 ДН антенны в режиме передачи или приема в зависимости от того, что более удобно.

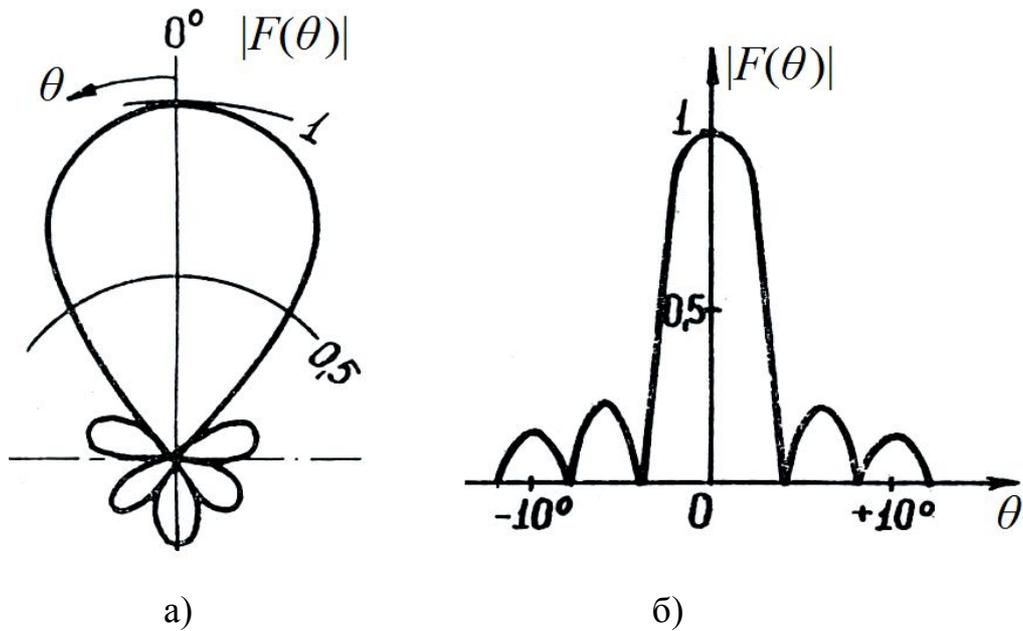


Рис. А.1. Амплитудные ДН:

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

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

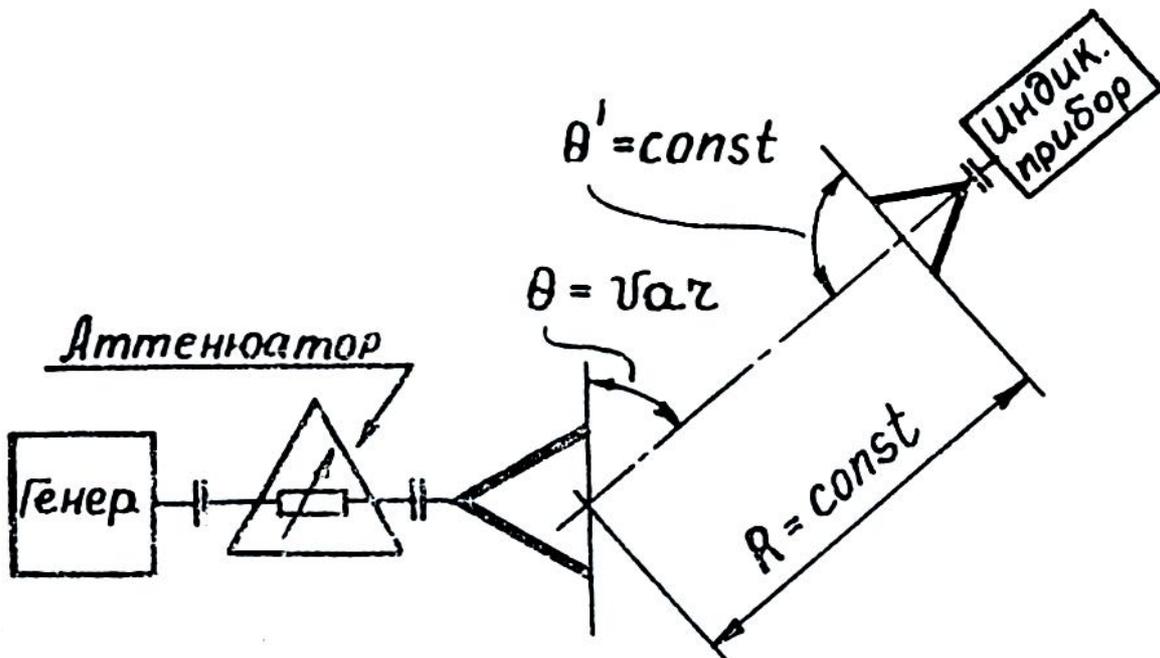


Рис. А.2. Схема установки для снятия ДН

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

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

Для наиболее точного построения ДН 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 ДН при эксперименте фиксируют по возможности точнее.

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

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

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. А.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

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

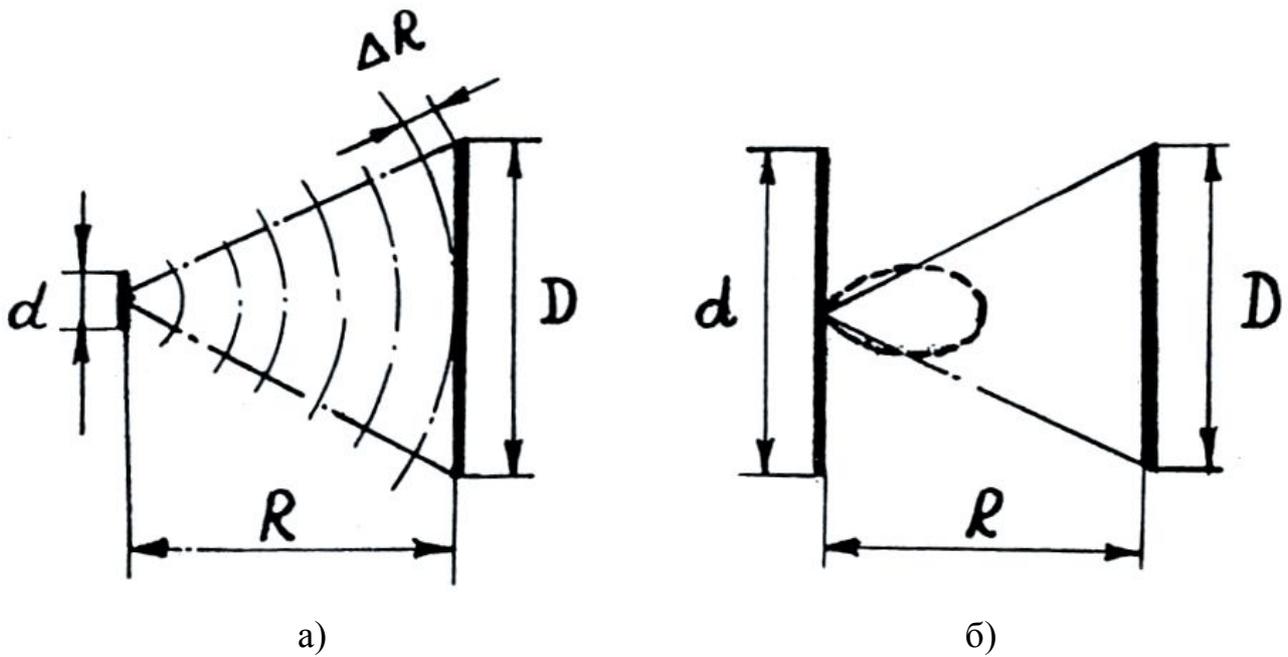


Рис. А.3. Схема для определения расстояния между антеннами при измерении ДН: *а* – с учетом только фазовой ошибки; *б* – с учетом только амплитудной ошибки

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 ДН передающей антенны (рис. А.3,б). Влияние указанных ошибок становится незначительным, если ДН снимать на расстоянии

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

При измерениях ДН 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 ДН «по мощности», т.е. $F^2(\theta, \varphi)$.

При точных измерениях ДН влияние нелинейности характеристики детектора можно избежать за счет применения градуированного аттенюатора (рис. А.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 ДН 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 ДН 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 ДН 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 ДН. Минимально допустимое расстояние между антеннами также определяется по формуле (А.4). Поскольку на КУ антенн сказываются фазовые и амплитудные ошибки в обеих плоскостях, то в формулу (А.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:

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

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. А.4) предназначен для измерения величины напряжения переменного тока в диапазоне 100 мкВ...300 В частотой 20 Гц...5 МГц.



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

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).

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 В» (как на рис. А.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. А.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. А.4), нужно разделить на 10. Тогда получим величину измеряемого напряжения. В нашем случае стрелка показывает «21», считаем: $21/10 = 2,1$ В.

Содержание

Цель работы	2
Теоретическая подготовка к работе	2
Расчетные задания и расчетные формулы	13
Экспериментальная часть	15
Описание установки и ее схема	15
Порядок выполнения эксперимента	17
Требования к отчету	20
Контрольные вопросы	21
Приложение А. Определение характеристик направленности антенны	
Снятие диаграммы направленности	22
Измерение коэффициента усиления антенн.....	26
Измерение при помощи милливольтметра ВЗ-38	27

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 Марков Г.Т., Сазонов Д.М., Антенны. М.: Энергия. 1975.