

Министерство образования и науки РФ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники
(СВЧ и КР)

Утверждаю
Зав. каф. СВЧ и КР
_____ С.Н. Шарангович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
АНТЕНН**

Руководство к лабораторной работе по дисциплинам;
«Устройства СВЧ и антенны»,
«Распространение радиоволн и АФУ»
для студентов специальностей 210302, 210303, 210304,
210312, 210313, 210401, 210403, 210405

Разработчики:
доцент каф. СВЧ и КР
_____ Замотринский В.А.,
зав. лаб. № 328
_____ Никифоров А.Н.
Новая редакция:
профессор каф. СВЧ и КР
Гошин Г.Г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы.....	3
2. Теоретические сведения.....	3
2.1. Диаграмма направленности и коэффициент усиления антенны.....	3
2.2. Конструкция и принцип работы диэлектрической антенны.....	4
3. Экспериментальная часть.....	8
3.1. Описание экспериментальной установки.....	8
3.2. Методика измерения диаграмм направленности.....	8
3.3. Методика измерения коэффициента усиления.....	10
3.4. Порядок измерения диаграмм направленности.....	10
3.5. Порядок измерения коэффициента усиления.....	11
3.6. Обработка экспериментальных данных и расчётное задание.....	12
4. Контрольные вопросы.....	12
5. Список литературы.....	13
Приложение 1.....	13
Приложение 2.....	14

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование конструкций и свойств диэлектрических антенн (ДА), а также методов экспериментального определения диаграммы направленности (ДН) и коэффициента усиления (КУ) антенн.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1 Диаграмма направленности и коэффициент усиления антенн

Амплитуда напряженности электрического поля любой излучающей антенны в свободном пространстве в дальней зоне может быть определена по формуле

$$E = \frac{\sqrt{60PG}}{r} F(\theta, \varphi), \quad (1)$$

где P – подводимая к антенне мощность,

G – коэффициент усиления антенны,

r – расстояние от антенны до точки наблюдения,

$F(\theta, \varphi)$ – амплитудная диаграмма направленности антенны,

θ и φ – угловые координаты точки наблюдения.

Антенна предполагается расположенной в начале сферической системы координат r, θ, φ . Дальней зоной антенны называется та часть пространства, окружающего антенну, для точек которого лучи, идущие от всех точек антенны в точку наблюдения, можно считать параллельными (с определенной погрешностью). Если L_1 – максимальный размер передающей антенны, то при фазовой погрешности $\pi/8$ граница дальней зоны до точки приёма определяется условием

$$r \geq \frac{2L_1^2}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ – длина волны, излучаемая антенной.

Если в точке приёма находится приёмная антенны с размером L_2 , то граница дальней зоны между этими антеннами отодвигается до расстояния

$$r \geq \frac{2(L_1 + L_2)^2}{\lambda}. \quad (3)$$

Диаграмма направленности антенны – это зависимость амплитуды напряженности электрического поля от угловых координат точки наблюдения, находящейся на сфере с радиусом $r \rightarrow \infty$. Пространственная ДН может быть изображена в виде некоторой замкнутой поверхности. Радиус-вектор, проведенный от начала координат до некоторой точки этой поверхности, пропорционален полю излучения в данном направлении. Сечения пространственной диаграммы плоскостями, проходящими через центр, называют диаграммами направленности в соответствующих плоскостях. Например, это могут быть ДН в вертикальной и горизонтальной плоскостях, или в E - и H -плоскостях. В формуле (1) ДН предполагается нормированной, т.е. её значение в направлении максимального излучения равно 1. Характерным признаком дальней зоны является то, что ДН антенны не зависит от расстояния r . На более близких расстояниях это свойство ДН не выполняется. Изображение диаграмм направленности в

различных сечениях может проводиться в декартовой или полярной системах координат.

Выясним смысл коэффициента усиления антенны (КУ или G). Из формулы (1) видно, что КУ определяет напряженность поля в точке приёма, как и подводимая к антенне мощность P . Коэффициентом усиления антенны называется число, показывающее во сколько раз нужно уменьшить подводимую к антенне мощность при переходе от изотропной (ненаправленной) антенны с $G = 1$ к направленной ($G > 1$), чтобы напряжённость поля в точке приёма не изменилась. Коэффициент усиления оценивается в направлении максимума ДН. Таким образом, усиление антенны определяется из сравнения её с изотропным излучателем и связано с направленным излучением реальной антенны.

Подводимая к антенне мощность (P) не только излучается (P_{Σ}), но и теряется в самой антенне в виде тепловых потерь (P_{nom}). Тогда $P = P_{\Sigma} + P_{nom}$ и коэффициент полезного действия антенны (КПД) определяется как

$$\eta = \frac{P_{\Sigma}}{P} \quad (4)$$

С параметрами КУ и КПД антенны связан еще один параметр – коэффициент направленного действия (КНД или D) соотношением

$$G = \eta D. \quad (5)$$

КНД антенны зависит только от направленности антенны и не учитывает потери энергии в самой антенне.

В теории антенн показывается, что ДН и параметры антенны G , D , η не зависят от режима ее работы – излучение или приём радиоволн. Для приёмных антенн КУ показывает выигрыш по мощности в нагрузке антенны при замене изотропной антенны на направленную.

2.2. Конструкция и принцип работы диэлектрической антенны

Диэлектрическая антенна (ДА) состоит из диэлектрического стержня цилиндрической или конической формы (1), волновода (2), питающего фидера (3) и системы возбуждения волновода (4) (рис. 1). В качестве фидера обычно используется гибкий коаксиальный кабель.

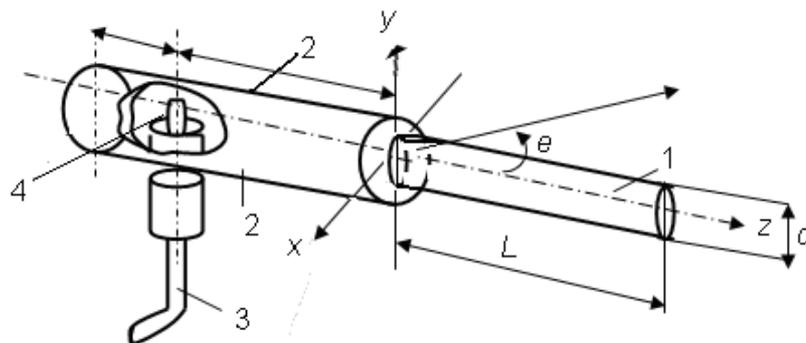


Рис. 1 – Конструкция диэлектрической стержневой антенны

Диэлектрические антенны относятся к классу антенн бегущей волны. Объяснить работу ДА можно на основе двух подходов: лучевого и волнового. Согласно первому, распространение волны представляется в виде лучей, которые, падая на границу диэлектрик – воздух, частично отражаются внутрь ди-

электрического стержня, частично преломляются в воздух и излучаются (рис. 2).

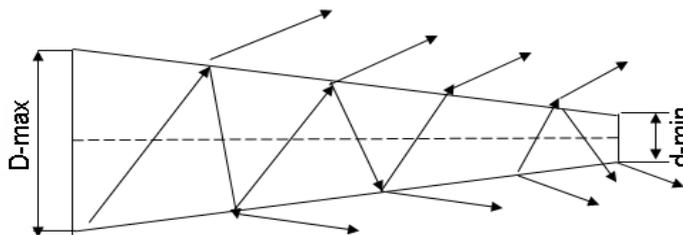
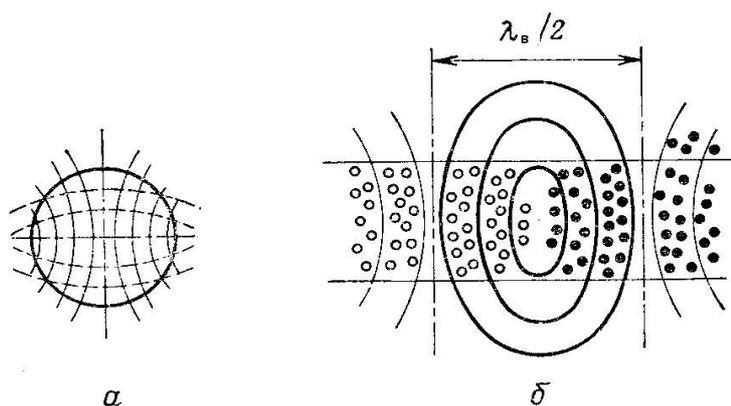


Рис. 2 – Представление волн в диэлектрическом стержне в виде лучей.

Волновой подход к анализу поля в диэлектрическом стержне основан на строгом решении уравнений Максвелла и следующих из них дифференциальных уравнений в частных производных с заданными граничными условиями, как это делается для металлических волноводов. При возбуждении ДА по схеме рис. 1 распределение силовых линий E и H приведено на рис. 3. Такой тип волны в диэлектрическом стержне называется гибридной волной HE_{11} . Буквы H или E означают, что составляющие H_z или E_z не равны нулю (ось z направлена вдоль антенны). Индекс 11 определяет число вариаций полей E и H по угловой и радиальной координатам цилиндрической системы. Внутри диэлектрического стержня структура поля напоминает основную волну круглого металлического волновода H_{11} . Отличие состоит в том, что в диэлектрическом стержне силовые линии вектора \vec{E} не строго перпендикулярны границе воздух – диэлектрик и вне стержня также существует поле. Это поле представляет собой поверхностную волну, которая распространяется вдоль стержня с фазовой скоростью $v_\phi < c$. Энергия поверхностной волны как бы «прилипает» к поверхности стержня, убывая при удалении от неё по экспоненциальному закону.



a – поперечное сечение, b – продольное, λ_g – длина волны в стержне; сплошные линии – силовые линии поля E , пунктирные – поля H .

Рис. 3 – Структура полей E и H для волны HE_{11}

Как показывает анализ волны HE_{11} , она распространяется вдоль стержня с фазовой скоростью меньшей скорости света в пустоте, но большей скорости электромагнитных волн в диэлектрике

$$c > v_{\phi} > \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (6)$$

Фазовая скорость волны в ДА зависит от относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика ϵ_r и от отношения диаметра стержня к длине волны в воздухе d/λ (рис. 4).

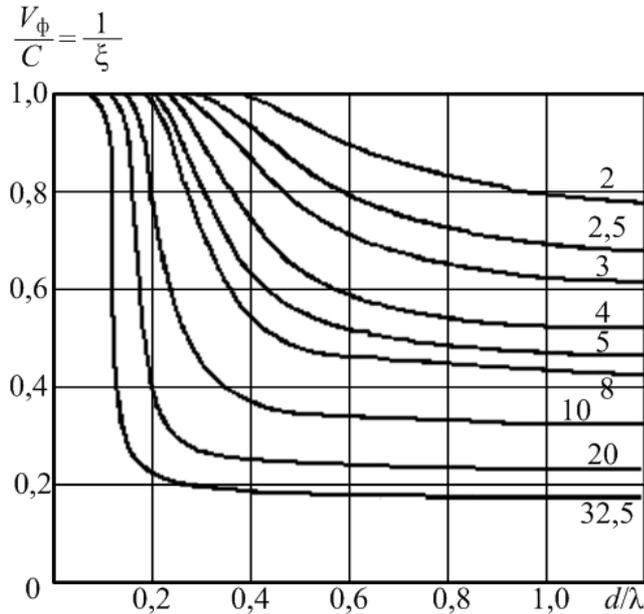


Рис. 4 – Графики зависимости фазовой скорости в диэлектрическом стержне от ϵ_r и отношения d/λ

Из графиков следует, что в тонких (по отношению к длине волны) стержнях фазовая скорость близка к скорости света, энергия при этом переносится в основном снаружи стержня поверхностной волной. В толстых стержнях энергия в основном сосредоточена внутри стержня и фазовая скорость близка к фазовой скорости волны в диэлектрике. В диэлектрических антеннах обычно используется переходная область этой зависимости.

Электрическое поле внутри стержня вызывает поляризацию диэлектрика, что приводит в поперечных сечениях к появлению токов поляризации с плотностью $\delta_{пол} = j\omega(\epsilon_r - 1)\epsilon_0\vec{E}$, где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость стержня, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума. Таким образом, ДА можно представить как непрерывную систему излучателей, расположенных вдоль антенны. Каждый излучатель представляет собой поперечное сечение стержня с протекающими в нём токами поляризации. Излучатели возбуждаются волной, бегущей внутри стержня с фазовой скоростью меньшей скорости света. Поэтому такие антенны относятся к классу антенн бегущей волны с замедленной фазовой скоростью.

Диаграмма направленности таких антенн представляется в соответствии с принципом перемножения ДН непрерывной системы одинаковых излучателей в виде

$$F(\theta) = F_1(\theta) \frac{\sin u}{u}, \quad (7)$$

где $F_1(\theta) = J_0(ka \sin \theta)$ – ДН одного элемента (поперечного сечения); a – радиус стержня; $J_0(x)$ – функция Бесселя нулевого порядка; $u = \frac{kL}{2}(\cos \theta - \xi)$; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число в свободном пространстве; L – длина антенны; θ – угол, отсчитываемый от оси антенны; $\xi = \frac{c}{v_\phi}$ – коэффициент замедления волны в стержне.

Характерным для этого класса антенн является то, что в направлении максимального излучения ($\theta = 0$) поля от отдельных излучателей складываются не в фазе, поскольку $v_\phi < c$. Поэтому для таких антенн существуют понятия «оптимальная длина антенны» и «оптимальный коэффициент замедления». Они определяются формулами

$$L_{opt} = \frac{\lambda}{2(\xi - 1)}; \quad \xi_{opt} = 1 + \frac{\lambda}{2L}. \quad (8)$$

Антенны оптимальной длины имеют максимально возможный КНД при изменении L (или ξ) и неизменных остальных параметрах. Если длина антенны превышает оптимальную, то главный лепесток сужается, но при этом возрастает уровень боковых лепестков. При укорочении антенны по сравнению с оптимальной наблюдается противоположные изменения. Для оптимальных антенн справедливы формулы

$$D \approx (7...8) \frac{L_{opt}}{\lambda}, \quad 2\theta_{0,5} \approx 61^\circ \sqrt{\frac{L_{opt}}{\lambda}}. \quad (9)$$

Приведенные формулы носят приближенный характер, так как при их выводе не учитывались потери в диэлектрике и наличие отражений от конца стержня. Наличие отраженной волны приводит к возрастанию уровня боковых лепестков ДН, что является нежелательным. Для уменьшения отражения волны от конца стержня его диаметр постепенно уменьшают к концу. Согласно графикам рис. 4, это приводит к постепенному возрастанию фазовой скорости к концу стержня и уменьшению амплитуды отраженной волны. Обычно максимальный диаметр антенны равен диаметру питающего волновода и выбирается из условия отсутствия волн высших типов

$$d_{max} = \frac{\lambda}{\sqrt{\pi(\epsilon_r - 1)}}. \quad (10)$$

Минимальный диаметр антенны берётся равным

$$d_{min} = \frac{\lambda}{\sqrt{2,5\pi(\epsilon_r - 1)}}. \quad (11)$$

При таком соотношении между диаметрами фазовая скорость меняется вдоль антенны по линейному закону, что обеспечивает низкий уровень боковых лепестков.

Достоинством диэлектрических антенн является их компактность, простота конструкции, хорошие диапазонные свойства. Недостаток заключается в наличии потерь в диэлектрике, что ограничивает излучение больших мощностей. Диэлектрические антенны применяются как в качестве самостоятельных приёмо-передающих антенн, так и в качестве элементов решёток.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Описание экспериментальной установки

Блок-схема экспериментальной установки изображена на рис. 4. Высокочастотный сигнал ($f \approx 10\text{ГГц}$) от генератора (Г) по изогнутому прямоугольному волноводу поступает на измерительную линию (ИЛ) и далее через вращающееся сочленение (ВС) и переход с прямоугольного волновода на круглый (ППК), в который вставляются исследуемые антенны. Электромагнитная волна, излучённая этими антеннами, принимается приёмной рупорной антенной (Р) и поступает на детекторную секцию (ДС). Продетектированный сигнал через переключатель (П) подается на вход измерительного усилителя (У). Через переключатель (П) на усилитель может также подаваться напряжение с детектора (Д) измерительной линии. Высокочастотный сигнал генератора промодулирован по амплитуде прямоугольными импульсами со скважностью 2 и частотой 1 кГц. Такой вид модуляции называется «меандр».

3.2. Методика измерения диаграмм направленности

Измерение (снятие) ДН осуществляется путем поворота антенны вокруг ее вертикальной оси и замера напряжённости поля с помощью приёмной рупорной антенны (Р) и индикатора поля – детекторной секции (ДС) и усилителя (У). В данной работе ДН снимается только в горизонтальной плоскости H .

Основными количественными характеристиками ДН являются форма и ширина главного лепестка, величина и расположение в пространстве боковых лепестков. ДН может быть построена в полярной или декартовой системе координат. В полярной системе координат величине напряжённости поля пропорционален радиус-вектор, в декартовой системе по оси абсцисс откладывается угол, характеризующий направление на приёмную антенну, а по оси ординат – значения напряжённости поля. Перед построением ДН, показания усилителя нормируют (делят на максимальное из всех значений) и извлекают корень квадратный. Это вызвано тем, что показания усилителя пропорциональны квадрату напряженности поля в приемной антенне, потому что вольт-амперная характеристика (ВАХ) кристаллического детектора является квадратичной.

Ширина главного лепестка определяется путем проведения через точку 0,7 на оси ординат прямой, параллельной оси абсцисс. Опустив перпендикуляры из точек пересечения этой прямой с ДН, получаем на оси абсцисс ширину главного лепестка.

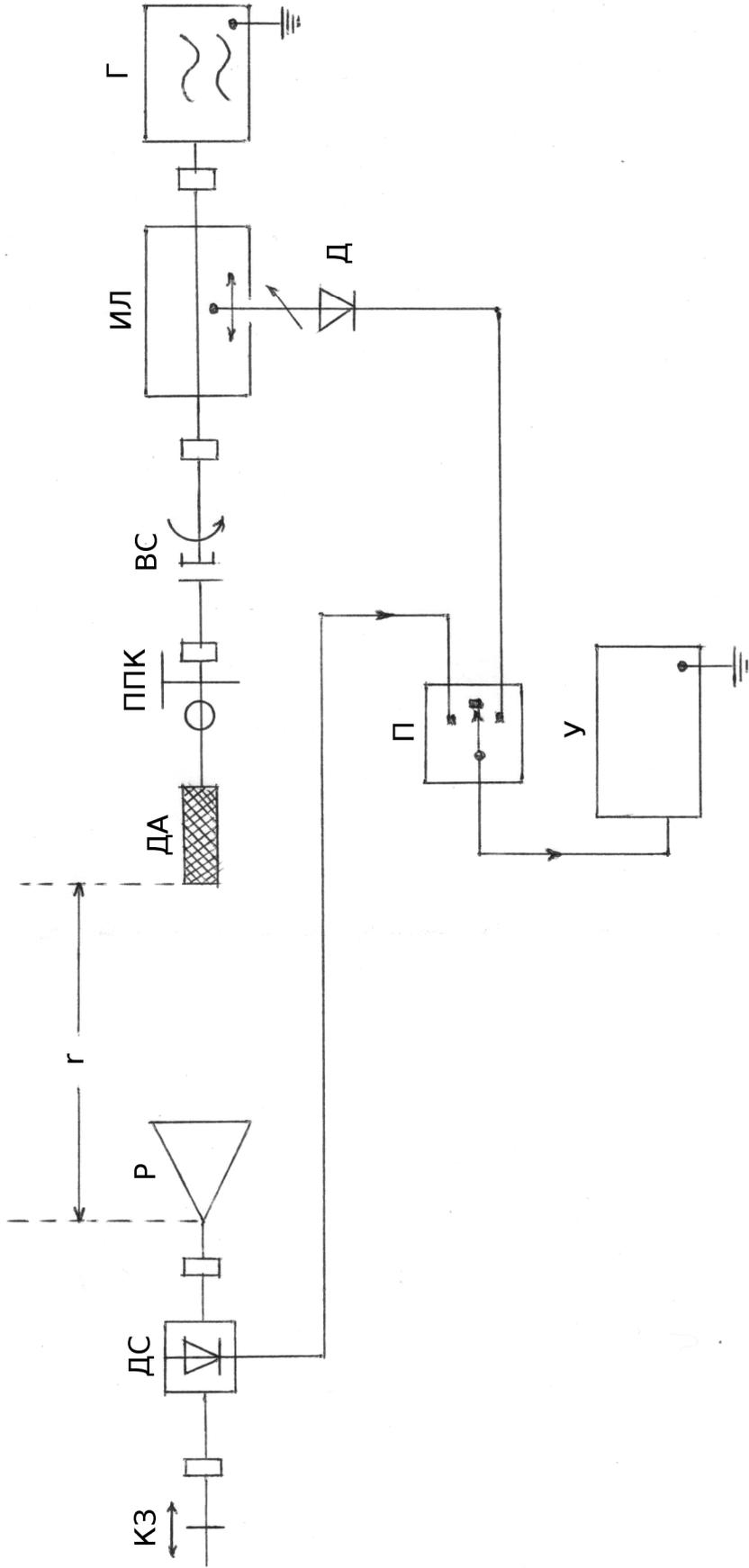


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки

Г - генератор Г4-126, ИЛ - измерительная линия Р1-27, ВС - вращающееся соединение, ППК - переход с прямоугольного волновода на круглый, ДА - диэлектрическая антенна, Р - рупор, ДС - детекторная секция, КЗ - короткое замыкание (поршень), П - переключатель к У2-4, Д - диод, У - усилитель У2-4, г - расстояние между передающей и приёмной антеннами.

3.3. Методика измерения коэффициента усиления

В работе коэффициент усиления определяется методом сравнения исследуемой антенны с эталонной. Из формулы (1) следует, что если сравнивать напряжённости поля на одинаковых расстояниях от исследуемой антенны в направлении максимума ДН и от эталонной, то получим соотношение

$$\left(\frac{E}{E_{эм}} \right)^2 = \frac{G}{G_{эм}} \frac{P}{P_{эм}}. \quad (12)$$

Мощность, подводимая к антенне, может быть определена по формуле

$$P = \frac{U_{max} U_{min}}{2W}, \quad (13)$$

где U_{max} и U_{min} – максимальное и минимальное напряжение в линии передачи, W – волновое сопротивление линии.

Отношение U_{min} / U_{max} называется коэффициентом бегущей волны (КБВ) и характеризует согласование антенны с фидером. При КБВ = 1 отраженная волна отсутствует и вся мощность падающей волны поступает в антенну. При КБВ = 0 энергия падающей волны полностью отражается. Наряду с КБВ часто используется обратная величина – коэффициент стоячей волны (КСВ). Подставляя (13) в (12) получим

$$G = G_{эм} \frac{E^2 (U_{max} U_{min})_{эм}}{E^2 (U_{max} U_{min})}, \quad (14)$$

где $G_{эм}$ – коэффициент усиления эталонной пирамидальной рупорной антенны, который определяется по формуле

$$G_{эм} = 0,64 \frac{4\pi}{\lambda^2} S, \quad (15)$$

где S – поверхность раскрыва эталонной антенны ($S = 80\text{см}^2$).

3.4. Порядок измерения диаграмм направленности

1. Убедиться, что приёмная и передающая антенны находятся в дальней зоне. Для этого проверить выполнение соотношения (3) для размеров антенн: $L_1 = 3$ см (диэлектрическая), $L_2 = 18$ см (рупорная приёмная), $r = 157$ см, $\lambda \approx 3$ см.

2. Установить передающую и приёмную антенны так, чтобы их геометрические оси совпали. Если это условие не выполняется, возможны искажения формы ДН.

3. Включить генератор и настроить его в соответствии с инструкцией к прибору, установить рабочую частоту по указанию преподавателя, но не более 9400 МГц.

4. Поставить переключатель П в положение «приёмная антенна». Настроить детекторную секцию в приёмной антенне на частоту генератора. Для этого

поршень КЗ детекторной секции (ДС) установить в положение, соответствующее максимальным показаниям усилителя.

5. Установить выходной аттенюатор генератора и входной делитель усилителя в положения, удобные для измерений. Поворачивая диэлектрическую антенну в горизонтальной плоскости, через 5° снять зависимость показаний с приёмной антенны α от угла поворота антенны θ в пределах $\pm 90^\circ$. Результаты измерений занести в столбцы 1 и 2 таблицы 1.

Таблица 1

Угол θ	Показания прибора α	$F(\theta) = \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha_{\max}}}$	Расчётная ДН $F(\theta)$

6. Повторить измерения ДН для антенн, указанных преподавателем

3.5. Порядок измерения коэффициента усиления

1. Открытый конец круглого волновода (ОКВ) сам является слабонаправленной апертурной антенной. Представляет интерес сравнить КУ ОКВ и ОКВ с диэлектрическим стержнем, т.е. с диэлектрической антенной.

2. Подсоединить ОКВ к фланцу вращающегося сочленения. Переключателем П присоединить усилитель к измерительной линии и настроить детекторную секцию измерительной линии на частоту генератора передвижными короткозамыкателями.

3. Аттенюатором генератора и входным делителем усилителя получить удобные для измерений показания усилителя в обоих положениях переключателя П. После этого нельзя менять настройку генератора, ослабление его аттенюатора и настройку детекторных секций приёмной антенны и измерительной линии.

4. Перемещая каретку измерительной линии, определить α_{\max} , α_{\min} . Переключить усилитель на приёмную антенну и измерить значение α_E в направлении максимального излучения антенны. Следует иметь в виду, что показания усилителя α пропорциональны квадратам измеряемых величин.

5. Данные измерений в виде показаний усилителя занести в таблицу 2.

Таблица 2

Тип антенны	α_{\min}	$U_{\min} \approx \sqrt{\alpha_{\min}}$	α_{\max}	$U_{\max} \approx \sqrt{\alpha_{\max}}$	α_E	$E \approx \sqrt{\alpha_E}$	G	КБВ

6. Вставить в ОКВ диэлектрический стержень до фаски и повторить измерения п.4. Данные занести в следующую строку таблицы 2.

7. Повторить измерения для других диэлектрических антенн по указанию преподавателя.

8. Заменить диэлектрическую антенну на эталонную рупорную и провести измерения $(U_{\min}, U_{\max})_{\text{эт}}$ и $E_{\text{эт}}$. Данные занести в таблицу 2.

3.6. Обработка экспериментальных данных и расчётное задание

1. Данные по измерениям ДН исследованных антенн пронормировать и извлечь из них корень квадратный. Результаты для каждой антенны занести в столбец 3 Таблицы 1.

2. Построить экспериментальные ДН в декартовой системе координат, определить ширину главного лепестка на уровне 0,7 и уровень боковых лепестков.

3. Рассчитать ДН исследованных диэлектрических антенн по формуле (7). Значения функций Бесселя $J_0(x)$ и коэффициента замедления ξ приведены в Приложении. Результаты расчета занести в столбец 4 Таблицы 1. Рассчитанные ДН нанести на графики экспериментальных и сравнить.

4. Рассчитать значения G исследованных антенн по формуле (14) и коэффициент бегущей волны в тракте исследуемых антенн, как U_{\min}/U_{\max} . Данные занести в Таблицу 2.

5. Сравнить полученные значения G диэлектрических антенн со значениями D оптимальных антенн (9), полагая что $L=L_{\text{opt}}$ и $G \approx D$.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные факторы, определяющие форму диаграммы направленности и коэффициент усиления диэлектрических антенн ?
2. Что такое оптимальная длина антенны ?
3. Что такое оптимальная фазовая скорость ?
4. В чем заключается сущность метода сравнения для измерения коэффициента усиления антенн ?
5. Почему в работе измеряется G , а не D антенн?
6. Почему в работе в качестве эталонной антенны используется рупор, а не другая антенна, например, вибратор?
7. Изобразите (качественно) диаграммы исследованных антенн в полярной системе координат.
10. Как ориентированы в данной работе плоскости E и H и почему?
11. Как в работе определяется подводимая к антенне мощность?
12. Как в работе учитываются характеристики детекторов в ДС и ИЛ? Зачем это нужно делать?
13. К каким классам относятся используемые в работе антенны: ОКВ, рупорная, диэлектрическая. Поясните смысл названий этих классов.
14. Охарактеризуйте поверхностную волну, существующую в диэлектрической антенне: где она существует, какова её скорость и почему так называется?
15. В чем сущность лучевого и волнового подходов к анализу диэлектрических антенн?
16. Для чего диэлектрические антенны делают коническими?

17. Почему в данной установке генератор должен работать в режиме внутренней манипуляции?
18. Как настраивается генератор на максимальную генерируемую и отдаваемую в нагрузку мощность?
19. Как образом измеряется частота генератора?
20. Как измеряется КБВ антенн? Что он характеризует?

5. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для вузов/ Д.И. Воскресенский и др. – М.: Радиотехника, 2006. – 375с.
2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 432с.
3. Ерохин Г.А. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 491с.
4. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Ред. Н.М. Цейтлин. – М.: Радио и связь, 1985. – 368с.
5. Славников В.С. Общие требования и правила оформления отчёта о лабораторной работе: Методические указания. – Томск: ТУСУР, 1983. – 14с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАМЕДЛЕНИЯ $\xi = v_{\phi}/c$ В
 ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ СТЕРЖНЕ ОТ ОТНОШЕНИЯ d/λ

d/λ	$\varepsilon_r = 2.08,$ фторопласт ξ	$\varepsilon_r = 2.61,$ плексиглас ξ	$\varepsilon_r = 2.67,$ эбонит ξ
0.4	0.972	0.922	0.915
0.45	0.949	0.879	0.870
0.5	0.923	0.839	0.829
0.55	0.898	0.804	0.794
0.6	0.874	0.776	0.766
0.65	0.853	0.754	0.744
0.7	0.834	0.736	0.726
0.75	0.819	0.721	0.712
0.8	0.805	0.709	0.700
0.85	0.794	0.700	0.690
0.9	0.784	0.691	0.682
0.95	0.776	0.683	0.675
1.0	0.768	0.677	0.669
1.05	0.762	0.672	0.664
1.1	0.756	0.667	0.659
1.15	0.751	0.663	0.655
1.2	0.747	0.660	0.652
1.25	0.743	0.657	0.649
1.3	0.740	0.654	0.646

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ТАБЛИЦА ЗНАЧЕНИЙ ФУНКЦИИ $J_0(x)$

x	$J_0(x)$	x	$J_0(x)$	x	$J_0(x)$
0	1	1.5	0.512	3.0	-0.26
0.1	0.998	1.6	0.455	3.1	-0.292
0.2	0.99	1.7	0.398	3.2	-0.32
0.3	0.978	1.8	0.34	3.3	-0.344
0.4	0.96	1.9	0.282	3.4	-0.364
0.5	0.938	2.0	0.224	3.5	-0.38
0.6	0.912	2.1	0.167	3.6	-0.392
0.7	0.881	2.2	0.11	3.7	-0.399
0.8	0.846	2.3	0.056	3.8	-0.403
0.9	0.808	2.4	0.002	3.9	-0.402
1.0	0.765	2.5	-0.048	4.0	-0.397
1.1	0.72	2.6	-0.097	4.1	-0.389
1.2	0.671	2.7	-0.142	4.2	-0.377
1.3	0.62	2.8	-0.185	4.3	-0.363
1.4	0.567	2.9	-0.224	4.4	-0.342