

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению практических работ
по дисциплине «Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн»
для студентов направления подготовки
11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
Направленность (профиль)
«Технологии построения программно-управляемых систем и компьютерных сетей»

Ставрополь
2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

1. Моделирование и исследование процесса распространения земных радиоволн
2. Моделирование и исследование процесса распространения тропосферных радиоволн
3. Моделирование и исследование процесса распространения ионосферных радиоволн
4. Моделирование и исследование процесса распространения радиоволн на спутниковых радиолиниях
5. Моделирование и исследование параметров и характеристик антенн
6. Моделирование и исследование антенных решеток
7. Моделирование и исследование вибраторных антенн
8. Моделирование и исследование апертурных антенн
9. Моделирование и исследование антенн с бегущей волной тока

ВВЕДЕНИЕ

1. Цели и задачи освоения дисциплины:

Выполнения лабораторных работ по дисциплине «Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн» обеспечивают формирование у обучающихся набора профессиональных компетенций (ПК-1, ПК-3), которые обеспечивают их профессиональную деятельность в области эксплуатации антенно-фидерных устройств различных типов:

1. Способность иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях; осуществлять компьютерное моделирование устройств, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ.
2. Способность использовать нормативную и правовую документацию, характерную для области инфокоммуникационных технологий и систем связи.
3. Способностью осуществлять монтаж, наладку, настройку, регулировку, опытную проверку работоспособности, испытания и сдачу в эксплуатацию сооружений, средств и оборудования сетей и организаций связи.

При выполнении лабораторных работ студенты закрепляют, полученные знания по следующим вопросам:

- принцип работы, устройство и характеристики антенно-фидерных устройств различных типов;
- методов расчета радиолиний;
- особенности применения антенно-фидерных устройств в системах радиосвязи.

2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ПК-1 Способен осуществлять эксплуатацию радиоэлектронных систем	ИД-1 _{ПК-1} Определяет методы обработки результатов измерений с использованием средств вычислительной техники	Определяет методы обработки результатов измерений с использованием средств вычислительной техники
	ИД-2 _{ПК-1} Выявляет принципы работы, устройство, технические возможности радиоизмерительного оборудования в объеме выполненных работ	Выявляет принципы работы, устройство, технические возможности радиоизмерительного оборудования в объеме выполненных работ
	ИД-3 _{ПК-1} Анализирует информацию о качестве функционирования радиоэлектронных систем по результатам их эксплуатации	Анализирует информацию о качестве функционирования радиоэлектронных систем по результатам их эксплуатации
ПК-3 Способен проводить научно-теоретических	ИД-2 _{ПК-3} Применяет методы и	Применяет методы и

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
исследовательские работы по разработке инновационных радиоэлектронных средств различного назначения	экспериментальных исследований с использованием компьютерного моделирования, выполнения технических расчетов с применением средств вычислительной техники	экспериментальных исследований с использованием компьютерного моделирования, выполнения технических расчетов с применением средств вычислительной техники
	ИД-4 _{ПК-3} Выполняет технические расчеты с применением средств вычислительной техники	Выполняет технические расчеты с применением средств вычислительной техники
	ИД-7 _{ПК-3} Применяет основы теории антенн, механизмы распространения радиоволн, принципы построения и функционирования приемной и передающей аппаратуры, аппаратно-программные средства цифровой обработки сигналов, основные принципы радиолокации и навигации, средства связи, методы помехоустойчивого кодирования	Применяет основы теории антенн, механизмы распространения радиоволн, принципы построения и функционирования приемной и передающей аппаратуры, аппаратно-программные средства цифровой обработки сигналов, основные принципы радиолокации и навигации, средства связи, методы помехоустойчивого кодирования

Практическая работа 1.

Моделирование и исследование процесса распространения радиоволн при поднятых антеннах

Цель лабораторной работы: Исследовать зависимость множителя ослабления и напряженности поля в точке приема при распространении радиоволн при поднятых антеннах.

Учебные вопросы:

1. Моделирование и исследование процесса распространения радиоволн при поднятых антеннах для плоской земли.

2. Моделирование и исследование процесса распространения радиоволн при поднятых антеннах для сферической земли.

Задание

Исходные данные:

Мощность подводимая к антенне: $P_A = 19 + N$ [Вт], где N - номер курсанта по журналу;

Коэффициент усиления передающей антенны: $G_A = 20$ раз;

Высота подвеса антенн: $h_1 = h_2 = 41 - N$ [м];

Рабочая частота: $f = 300$ МГц.

Задание:

Выполнить необходимые расчеты для заполнения приведенной ниже таблицы (заполняются только светлые участки):

	$0,2r_0$	$0,5r_0$	$0,8r_0$	r_0	$1,2r_0$	$2r_0$
r						
$E_{св}$						
$E_{пл}$						
$E_{интер}$						
$E_{п.тени}$						
$E_{тени}$						

Методические рекомендации:

Дальность прямой видимости определяется соотношением

$$r_0 [м] = 3570 \times (\sqrt{h_1 [м]} + \sqrt{h_2 [м]}),$$

где h_1, h_2 -высоты подвеса антенн.

Напряженность поля в свободном пространстве определяется выражением

$$E_{св} = \frac{\sqrt{30 P_A G_A}}{r}.$$

Модуль коэффициента отражения поверхности земли при всех дальностях считать равным $R = 1$.

Общая формула для расчета напряженности поля

$$E = E_{св} \cdot F_{осл},$$

где $E_{св}$ – напряженность поля в свободном пространстве для заданной дальности;

$F_{\text{осл}}$ – множитель ослабления для заданной дальности.

Множитель ослабления для плоской поверхности рассчитывается по формуле

$$F_{\text{пл}} = \left| 2 \cdot \sin \frac{360^\circ \cdot \mathbf{h}_1 \cdot \mathbf{h}_2}{\lambda \cdot \mathbf{r}} \right|,$$

где λ – длина волны излучения;

$\mathbf{r}$ – расстояние до точки, в которой определяется множитель ослабления.

Множитель ослабления для сферической поверхности определяется

$$F_{\text{сф}} = \sqrt{1 + \mathbf{D}_p^2 - 2 \cdot \mathbf{D}_p \cdot \cos(\mathbf{k} \cdot \Delta \mathbf{r})},$$

где $\mathbf{D}_p$ – коэффициент расходимости, определяется отношением (3.1.17) стр.76 [1] или рисунок 3.1.3 стр. 77;

$\Delta \mathbf{r}$ – разность хода прямой и отраженной волны и определяется соотношением (3.1.4) стр.74, в котором $\mathbf{h}'_{1,2}$ определяется соотношением (3.1.10) стр.75;

$$\mathbf{k} = \frac{360^\circ}{\lambda} - \text{волновое число.}$$

Множитель ослабления для полутени (в дБ) $F_{\text{дб}}$ определяется соотношением (3.1.20) стр.78, в которой μ определяется соотношением (3.1.21) стр.79, а приведенные расстояния и масштабы высот $\mathbf{x}$, $\mathbf{x}_{\text{пр}}$, $\mathbf{y}_{1,2}$ определяется соотношением (2.4.8), (2.4.9) стр.58 [1], $a = 6380000$ м – радиус земли.

Множитель ослабления для полутени (в разях) равен $F_{\text{п.тени}} = 10^{\frac{F_{\text{дб}}}{20}}$.

Множитель ослабления для тени определяется по трехчленной формуле

$$F_{\text{тени}} [\text{дб}] = U_1(\mathbf{x}) + V_1(\mathbf{y}_1) + V_1(\mathbf{y}_2),$$

где U_1 , V_1 определяются по графикам рис. 3.1.5, 3.1.6 стр.78 [1];

$\mathbf{x}$, $\mathbf{x}_{\text{пр}}$, $\mathbf{y}_{1,2}$ определяется соотношением (2.4.8), (2.4.9) стр.58.

Множитель ослабления для тени (в разях) равен $F_{\text{тени}} = 10^{\frac{F_{\text{дб}}}{20}}$.

Практическая работа 2.

Моделирование и исследование процесса распространения радиоволн на тропосферной радиолинии

Цель лабораторной работы: Исследовать зависимость множителя ослабления и напряженности поля в точке приема при распространении радиоволн на тропосферной радиолинии.

Учебные вопросы:

1. Исследование множителя ослабления от расстояния.
2. Исследование поглощения в тропосфере от расстояния.

Задание на лабораторное занятие

Исходные данные:

Мощность, подводимая к антенне: $P_a = 100 \cdot N_0$ Вт, где N_0 -номер студента по журналу;

Коэффициент усиления передающей антенны $G_1 = (30 + N_0)$ дБ;

Коэффициент усиления приемной антенны $G_2 = 30$ дБ;

Длина волны $\lambda = 5 \cdot N_0$ см;

Индекс преломления $N_0 = 295 + N_0$;

Количество разнесений $n = 2$;

Процент времени достоверного приема $p_1 = 99,5\%$

Надежность связи $p = 0,9$

Задание:

Выполнить необходимые расчеты для заполнения приведенной ниже таблицы:

г (км)	100	200	400	500	600	800
E_{CB}						
F_{CT} дБ						
ΔG дБ						
ΔF_{MET} дБ						
F_2 дБ						
F_3 дБ						
F дБ						
F раз						
E_2						

Методика расчета тропосферной радиолинии Напряженность поля в свободном пространстве определяется по стандартной формуле

$$E_{CB} = \frac{\sqrt{30 \cdot P_a \cdot G_1}}{r}$$

в котором $G = 10^{0.1 \cdot G[\text{дБ}]}$

Стандартное ослабление F_{CT} дБ определяется для заданной длины волны λ и протяженности радиолинии либо по графикам рис.7.2.1. стр 221, либо по формулам (7.2.28, 7.2.29) [1].

Поправка на потери усиления антенн ΔG дБ вносится, если $G_1 + G_2 > 60$ дБ.

$$\Delta G[\text{дБ}] = 17 - 0.3 \cdot (G_1[\text{дБ}] + G_2[\text{дБ}]).$$

Метеорологическая поправка ΔF_{MET} дБ определяется индексом преломления N_0 и протяженностью радиолинии с помощью соотношений (7.3.1., 7.3.2.) стр. 222 [1].

F_2 дБ - множитель, учитывающий быстрые замирания, определяется количеством разнесений при приеме n и процентом времени достоверного приема p_1 по графикам на рис. 1.3.1. стр. 23 [1].

F_3 дБ - множитель, учитывающий медленные замирания. Он зависит от заданной надежности связи p и определяется с помощью соотношения (1.3.34) стр. 26 [1], где σ дБ определяется по графику рис. 7.4.1. стр. 224 [1], а t_p по графику рис. 1.3.2 стр 24 [1].

Общее ослабление F дБ определяется как сумма ранее рассчитанных:

$$F[\partial B] = F_{CT}[\partial B] + \Delta G[\partial B] + \Delta F_{MET}[\partial B] + F_2[\partial B] + F_3[\partial B]$$

$$F_{PA3} = 10^{0.05 \cdot F[\partial B]}$$

Напряженность поля в точке приема равна

$$E_2 = E_{CB} \cdot F_{PA3}$$

Практическая работа 3.

Моделирование и исследование процесса распространения ионосферных радиоволн.

Цель работы: Получить практические навыки в определении пригодности выбранного размещения РРС на планируемой трассе для обеспечения требуемого качества связи по её каналам.

Учебные вопросы:

1. Общие положения по расчету РРЛ.
2. Исходные данные для расчета РРЛ.
3. Требования к качественным характеристикам каналов РРЛ.
4. Порядок расчета РРЛ.

1. Общие положения по расчету РРЛ

Расчёт РРЛ - один из основных этапов её планирования. Цель расчёта состоит в определении пригодности выбранного размещения РРС на планируемой трассе для обеспечения требуемого качества связи по её каналам.

Качество РРЛ связано со степенью искажений сигналов на её интервалах. Поэтому методология расчёта РРЛ сводится к расчёту её интервалов.

Расчёт интервалов (определение их пригодности для обеспечения связи с требуемым качеством Q) производится на основе двух уравнений, связывающих параметры РРС и интервалов с качеством связи на этих интервалах.

Первое уравнение, называемое уравнением передачи, связывает мощность сигнала на входе приёмника с энергетическими параметрами РРС и затуханием (ослаблением) радиоволн на интервалах РРЛ (рисунок 1).

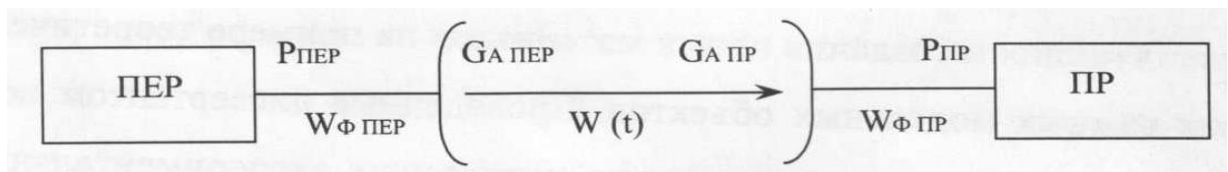


Рисунок 1. Обобщенная структура интервала РРЛ

Наиболее распространённой является его запись в логарифмических единицах

$$P_{\text{ПР}}(t) = P_{\text{ПЕР}} - W_{\text{ф.пер}} + G_{\text{а.пер}} + G_{\text{а.пр}} - W_{\text{ф.пр}} - W(t)_{\text{мед}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ПР}}(t)$ - мощность сигнала на входе приёмника, дБ/Вт; $P_{\text{ПЕР}}$ - мощность передатчика на выходе фидера передающей антенны, дБ/Вт; $W_{\text{ф.пр(пер)}}$ - ослабление радиоволн в фидере соответственно передающей и приёмной антенн, дБ; $G_{\text{а.пер(пр)}}$ - коэффициенты усиления антенн соответственно передающей и приёмной, дБ; $W(t)$ - медианное ослабление радиоволн без учёта их ослабления на замирания при распространении между антеннами интервала, дБ.

Второе уравнение, называемое уравнением качества, связывает качество связи по каналам интервала РРЛ с уровнем сигнала на входе приёмника $P_{\text{ПР}}$.

$$Q = f(P_{\text{ПР}}). \quad (2)$$

Проверка пригодности интервала проектируемой РРЛ производится по следующему алгоритму: по заданному качеству связи на интервале Q_i определяется мощность сигнала $P_{\text{ПР.ТРЕБ}}$, требуемая для обеспечения заданного качества Q_i .

$$P_{\text{ПР.ТРЕБ}} = F(Q_i). \quad (3)$$

Далее производится сравнение реальной, полученной при расчёте из уравнения (1) медианной мощности сигнала на входе приёмника $P_{\text{ПРМЕД}}$ (без учёта замираний радиоволн на интервале) с $P_{\text{ПР.ТРЕБ}}$, являющейся реальной чувствительностью приёмника. Очевидно,

для обеспечения связи по каналам с заданным качеством необходимо, чтобы $R_{\text{ПР.МЕД}}$ было больше $R_{\text{ПР.ТРЕБ}}$ на величину запаса уровня сигнала q_i на замирания.

$$q_i = R_{\text{ПР.МЕД}} - R_{\text{ПР.ТРЕБ}}. \quad (4)$$

По величине запаса ВЧ уровня q_i определяется потеря надёжности из-за замираний на интервале РРЛ по графикам зависимости $T_i\%$ от q_i .

$$T_i\% = f(W_3 = q_i). \quad (5)$$

Если величина потери надёжности связи на интервале $T_i\%$ больше $T_{i\% \text{зад}}$, то качество связи на интервале проектируемой РРЛ удовлетворяет заданным требованиям на качество связи.

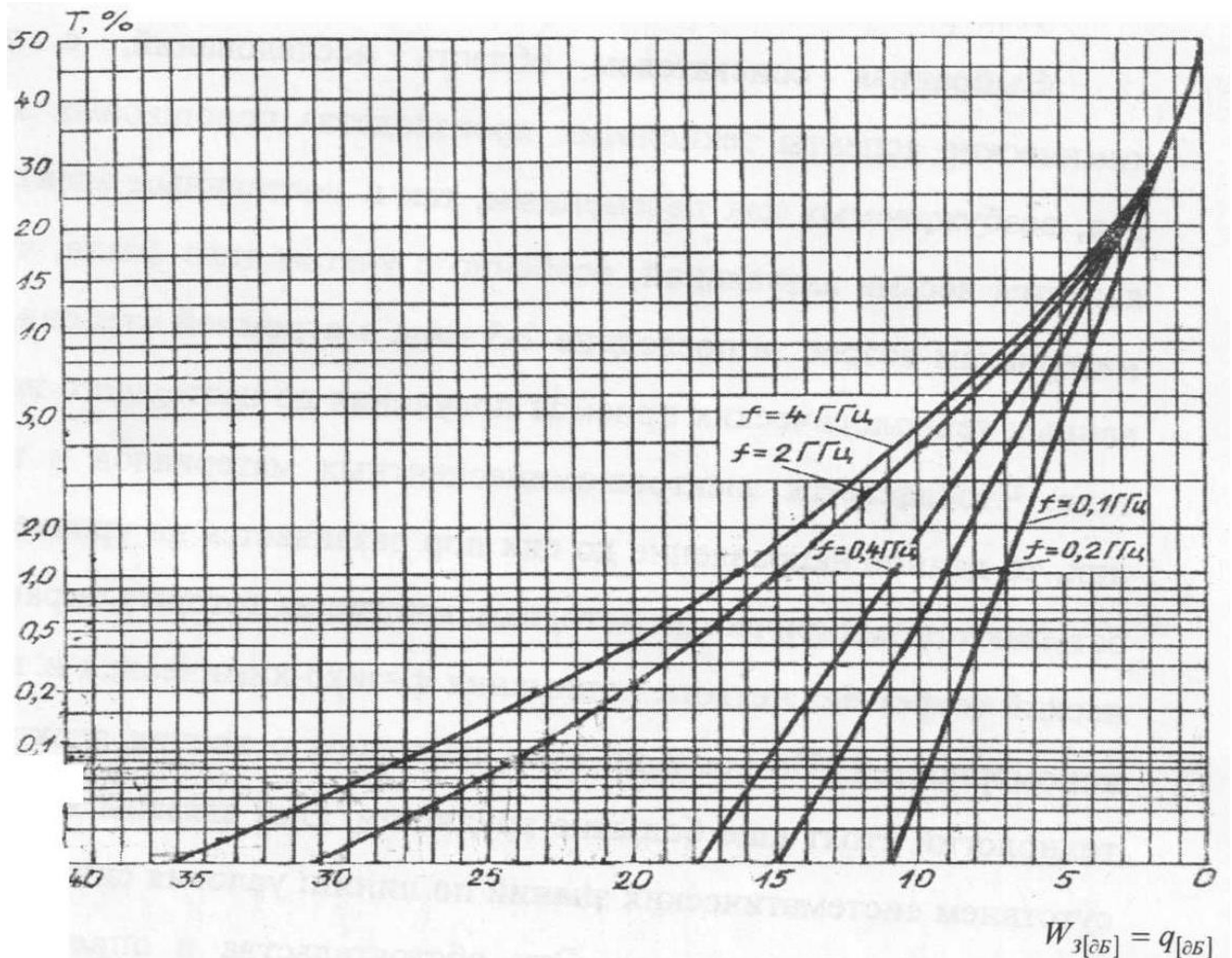


Рисунок 2. Зависимость $T_i\%$ от q_i

2. Исходные данные для расчета РРЛ

1. Тип станций, используемых для строительства РРЛ, и их технические характеристики: диапазон частот f_H и f_B , мощность передатчика $P_{\text{ПЕР}}$, коэффициент шума приёмника $\Pi_{\text{ш}}$, коэффициент усиления антенн G_A , ослабление сигнала в фидерах $W_{\text{ф}}$ трактов передачи и приёма.

2. Требование к качественным характеристикам каналов РРЛ.

3. Число интервалов в РРЛ полной протяжённости.

3. Требования к качественным характеристикам каналов РРЛ

Качественными характеристиками каналов РРЛ являются: шумовая защищённость $a_{\text{ш}}$ при передаче аналоговых сигналов и достоверность передачи Q_d или эквивалентная ей вероятность ошибки $P_{\text{ош}} = 1 - Q_d$ при передаче дискретных сигналов.

Шумовая защищённость выражается в логарифмических единицах (децибелах, неперах) как отношение мощности измеренного синусоидального сигнала частоты 800 Гц на выходе канала к суммарной мощности шумов в той же точке

$$a_{\text{ш}}[\text{дБ}] = 10 \lg \frac{P_{(F=800\text{Гц})}}{P_{\text{ш}}} \quad (6)$$

В зависимости от метода измерения различают шумы (и соответственно шумовую защищённость) интегральные, измеренные обычным вольтметром, и психометрические шумы, измеренные вольтметром с психометрическим фильтром, учитывающим частотную восприимчивость человеческого уха. Психометрическая мощность шума меньше интегральной и связана с ней психометрическим коэффициентом $K^2_{\text{пс}} = (0,75)^2 = 0,56$. Соответственно психометрическая шумовая защищённость больше интегральной на 2,6 дБ (0,3 Нп).

Для мобильных радиорелейных линий установлены нормы шумовой защищённости, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

Шумовая защищённость	Качество канала			
	хорошее		удовлетворительное	
$a_{\text{ш.пс}}$	37,3	4,3	31,2	3,6
$a_{\text{ш.инт}}$	34,8	4,0	28,7	3,3

Шумовая защищённость во времени является случайной величиной вследствие замирания сигнала на трассе интервала РРЛ. Надёжность по замираниям оценивается процентом времени Н%, в течение которого обеспечивается номинальное значение шумовой защищённости. Величина $T\% = 100 - Н\%$ является потерей надёжности по замираниям, равная выраженному в процентах отношению суммы отрезков времени Δt_i в течение которых $a_{\text{ш}}$ больше $a_{\text{ш.ном}}$, ко времени наблюдения t_H , равному одним, наихудшим по замираниям, суткам года.

$$T\% = (\sum \Delta t_i / t_H) 100\%. \quad (7)$$

В соответствии с нормами для мобильных РРЛ потеря надёжности линии связи по замираниям должна быть не более 5% времени $T\% \leq 5\%$; т. е. в течение 72 минут наихудших по замираниям суток года.

Для оценки глубины замираний на одном интервале РРЛ определяется допустимая потеря надёжности на одном интервале $T_1\%$. Она в М раз меньше, чем в линии, состоящей из М интервалов.

$$T_1\% = T\% / M. \quad (8)$$

Величину глубины замираний на одном интервале $W_3(T_1\%)$ можно определить по графикам рисунок 2.

Достоверность передачи дискретных сигналов по каналам ТЧ Q_d определяется отношением числа правильно принятых двоичных символов к общему числу символов, переданных за определённый (обычно нормируемый) промежуток времени (сеанс связи).

Потеря достоверности $P_{\text{ош}} = 1 - Q_d$ при передаче бинарной информации по каналам ТЧ с установленной скоростью (например, 1200 бит) не должна превышать нормированное значение $P_{\text{ош.ном}}$ (например, 10^{-4}) в течение Н% (например, 95%) времени сеанса передачи. При этом потеря надёжности должна составлять менее 5% $T\% < 5\%$ на линию полной протяжённости.

Потеря надёжности по замираниям на одном интервале РРЛ будет $T_1\% = T\% / M$.

4. Порядок расчета РРЛ

По топографической карте выбираются места разворачивания РРЛ на планируемой трассе РРЛ. Снимается профиль местности и строится в масштабе длин и высот чертёж на миллиметровой бумаге профиля местности на интервалах РРЛ.

Рассчитывается медианное ослабление радиоволн $W_{\text{мед.}i}$ (без учёта замираний) на каждом интервале РРЛ.

Определяется величина медианной мощности сигнала на входе приёмника $P_{\text{ПР.Мед.}i}$ каждого интервала.

Рассчитывается величина мощности сигнала, требуемая на входе приёмника для обеспечения связи на линии с заданным качеством, т. е. реальная чувствительность приёмника $P_{\text{рч.}}$.

Определяется запас высокочастотного уровня сигнала q_i на каждом интервале.

$$q_i = P_{\text{ПР.Мед.}i} - P_{\text{рч.}} \quad (9)$$

По величине запаса q_i определяется потеря надёжности по замираниям на интервалах по графикам рисунок 2.

Формулируется вывод о пригодности интервалов РРЛ для обеспечения связи в линии с заданным качеством. Если $T_1\% \leq T_1\%_{\text{доп}}$, то связь на заданном интервале будет обеспечена с заданным качеством.

Расчет ослабления радиоволны на интервале РРЛ

Расчёт медианного ослабления на интервалах РРЛ $W_{\text{мед.}i}$

Расчёт сводится к определению ослабления радиоволн в свободном пространстве $W_{\text{св}}$ и ослабления, вносимого рельефом местности $W_{\text{р.}}$.

$$W_{\text{мед.}i} = W_{\text{св.}i} + W_{\text{р.}i} \quad (10)$$

Величина ослабления радиоволн в свободном пространстве $W_{\text{св}i}$ определяется выражением (11).

$$W_{\text{св}i}[\text{дБ}] = 122 + 20 \lg R_{\text{км}} / \lambda_{\text{см}} \quad (11)$$

Величина ослабления сигнала рельефом местности $W_{\text{р.}i}$ определяется после построения профиля интервала на миллиметровой бумаге.

Построение чертежей профилей местности на интервалах РРЛ

Чертёж профиля местности интервала РРЛ является основным документом для расчёта ослабления, вносимого рельефом местности на интервале РРЛ. Чертёж профиля строится по топографической карте масштаба 1:100000 на миллиметровой бумаге в масштабе: расстояния 1 см - 2 км, высоты 1 см - 10 метров.

Чертёж профиля местности выполняется в следующем порядке:

1. Строится линия кривизны Земли, для чего:

- на листе миллиметровой бумаги (рис. 3) проводится прямая СД, на которой наносится точка «О», принимаемая в дальнейшем за середину профиля интервала;

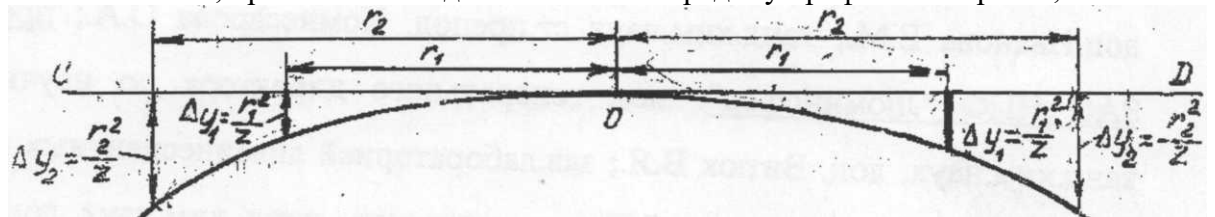


Рисунок 3. Чертёж профиля местности

- на прямой СД на равных расстояниях r от точки «О» откладываются вниз перпендикуляры длиной Δy в выбранном масштабе;

$$\Delta y[\text{м}] = r^2[\text{км}] / 17. \quad (12)$$

- концы перпендикуляра соединяются плавной кривой, являющейся линией кривизны Земли.

2. От линии кривизны Земли в принятом масштабе откладываются перпендикуляры к линии СД, длины которых берутся равными географическим высотам характерных точек местности, лежащих на интервале. Высоты точек определяются по топографической карте. Концы перпендикуляров соединяются плавной линией.

3. На полученную линию в принятом масштабе наносятся местные предметы (лес, массивы зданий и др.). Полученный чертёж является чертежом профиля местности интервала РРЛ (рис. 4).

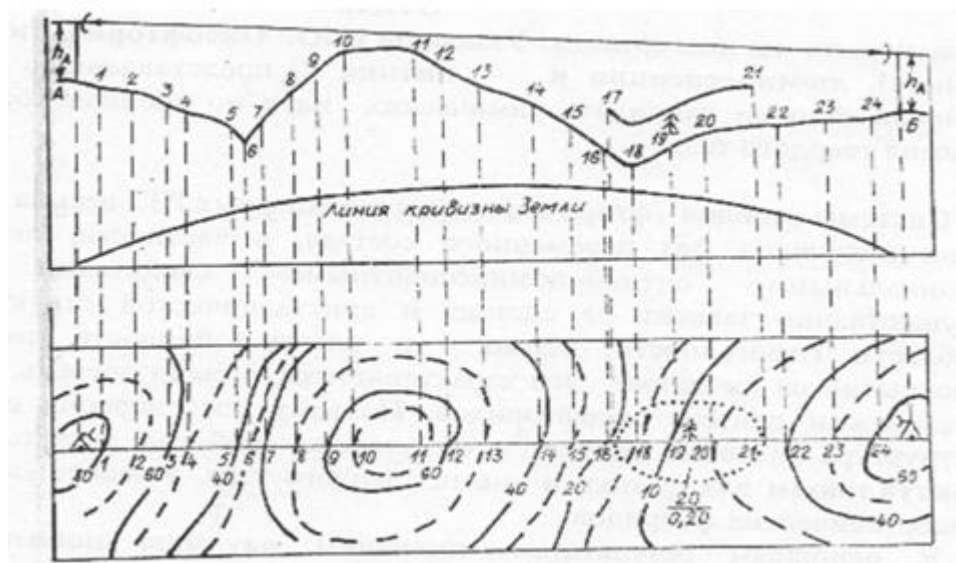


Рисунок 4. Чертёж профиля местности интервала РРЛ

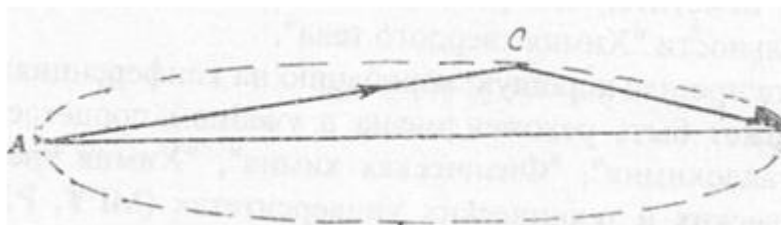
На этот чертёж в точках размещения РРС наносят высоты антенных опор. Электрические центры антенн соединяют прямой, называемой линией прямой видимости.

Влияние земной поверхности на распространение радиоволн на интервалах РРЛ

Распространение радиоволн непосредственно над земной поверхностью может привести к ряду нежелательных явлений:

- экранированию приёмников РРС от источника излучения (передатчика) рельефом или другими местными предметами (лес, строения и др.);
- появлению отражённых волн от земной поверхности и их интерференции с прямой волной.

Экранирование источника излучения местностью приводит к уменьшению уровня сигнала в точке приёма, т. е. дополнительному ослаблению по сравнению с распространением радиоволн в свободном пространстве. Для характеристики степени экранирования вводится понятие минимальной зоны, существенной для распространения. Под этой зоной понимают отверстие в экране с минимальным радиусом ρ_{min} , при котором поле в точке приёма равно полю свободного пространства, что имеет место при разности хода прямого и отражённого лучей $ACB-AB=\lambda/6$ (рис. 5).



Эллипс

Рисунок 5. Разность хода прямого и отражённого лучей

В данном случае радиус минимальной зоны определяется как

$$\rho_{min} = \sqrt{\frac{\lambda RK(1-K)}{3}},$$

(13)

где λ - длина рабочей волны; R - длина интервала; K - относительное расстояние до точки отражения, являющейся серединой препятствия. Величина K определяется как, $K = R_1/R$, (рис. 6).

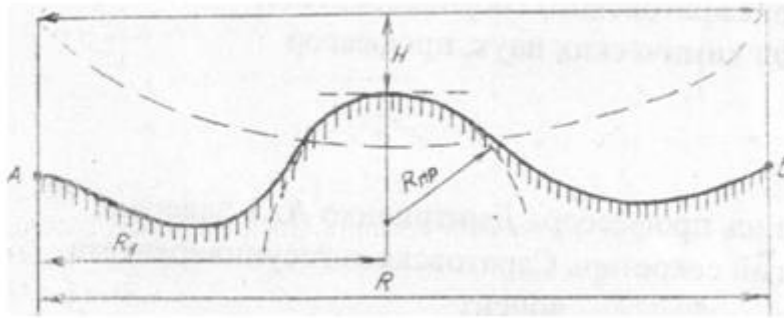


Рисунок 6. Графическая интерпретация величины K

В этой зоне, т. е. когда просвет H между линией прямой видимости и рельефом местности в любой точке интервала больше $\rho_{\min}$, уровень поля в точке приёма будет равен полю при распространении в свободном пространстве, т. е. экранированием местности можно пренебречь. В противном случае, когда $H < \rho_{\min}$, экранирующее действие местности необходимо учитывать.

По этому критерию осуществляется классификация интервалов. Интервал считается открытым (рис. 7), если величина просвета в любой точке интервала больше критической $H_0 = \rho_{\min}$, т. е. при условии

$$H \geq H_0 = \sqrt{\frac{\lambda R K (1-K)}{3}}. \quad (14)$$

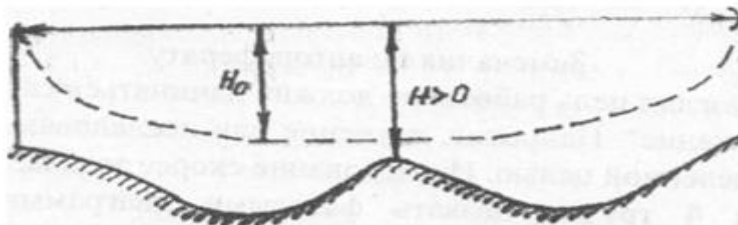


Рисунок 7. Открытый интервал

Интервал считается полуоткрытым (рис. 8), если хотя бы в одной точке интервала условие (14) не выполняется, но линия прямой видимости не пересекает рельеф местности и местных предметов, т. е. выполняется следующее условие $0 \leq H \leq H_0$.

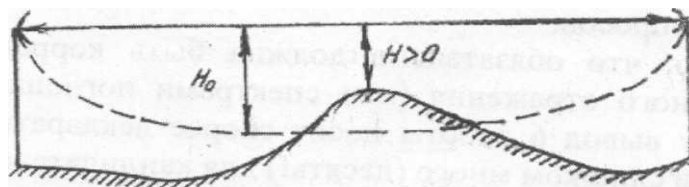


Рисунок 8. Полуоткрытый интервал

Интервал считается закрытым (рис. 9), если хотя бы в одной точке интервала линия прямой видимости пересекает препятствия (местные предметы), т. е. при условии $0 < H$.

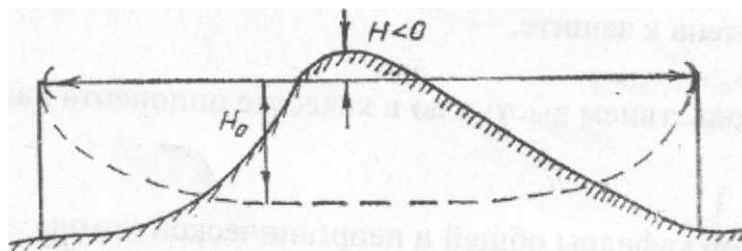


Рисунок 9. Закрытый интервал

Расчёт ослабления, вносимого рельефом местности, на полуоткрытых и закрытых интервалах

Оценка ослабления радиоволн, вносимого рельефом местности на полуоткрытых и закрытых интервалах с одним препятствием (рис 10), производится с учётом способности радиоволн огибать препятствия. Поэтому препятствия аппроксимируются сферами с определённым радиусом $R_{пр}$.

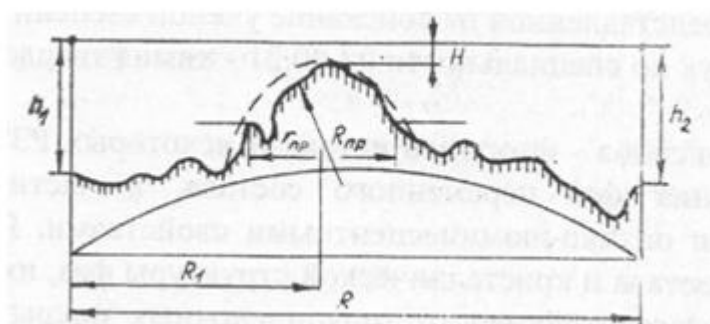


Рисунок 10. Интервала с одним препятствием

Ослабление тем больше, чем больше радиус препятствия $R_{пр}$ меньше просвет H и короче длина волны λ .

Радиус препятствия определяется расчётным путём или с помощью шаблонов. Для расчёта $R_{пр}$ используется формула

$$R_{пр}[\text{км}] = \frac{r_{пр}^2[\text{км}]}{8U[\text{км}]}, \quad (15)$$

где $r_{пр}$ - ширина препятствия на уровне секущей плоскости (рис.11).

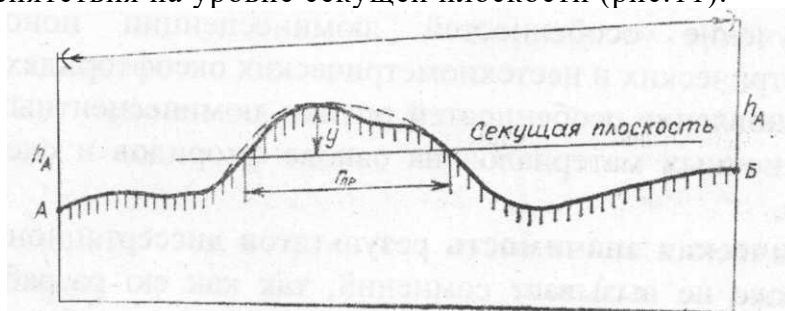


Рисунок 11. Ширина препятствия на уровне секущей плоскости

Секущая плоскость проводится на таком максимальном от вершины уровне, на котором ещё не нарушается сферичность препятствия до секущей плоскости.

Для определения радиуса препятствия по шаблону используется семейство аппроксимирующих кривых различных радиусов, построенных на кальке в том же масштабе расстояний и высот, как и профиль интервала (расстояний 1 см - 2 км; высот 1 см - 10 м). Радиус препятствия находится путём совмещения профиля препятствия с «подходящей» аппроксимирующей кривой.

Семейство кривых строится с использованием формулы (15). С этой целью, задавая конкретные $R_{пр}$, по значениям «У» вычисляют и откладывают на чертеже (кальке) соответственные им значения $r_{пр}$. Например, $R_{пр} = 500$ км; $У = 5, 10, 15, 20$ м; соответственно, $r_{пр}$ равняется корень квадратный из $8У R_{пр}$ и принимает значения 4,5; 6,35; 7,8; 9 ... км.

Ослабление радиоволн за счёт рельефа местности на интервале W_{pi} , рассчитывается по формуле

$$W_{pi}[\text{дБ}] = W_0(\mu)(1 - h), \quad (16)$$

где $W_0(\mu)$ - ослабление радиоволн, вызываемое препятствием, касающимся линии прямой видимости, т. е. $H=0$; μ - параметр клиновидности препятствия:

$$\mu = \sqrt[3]{\frac{R^2 K^2 (1 - K^2)}{R_{пр} H_0}}, \quad (17)$$

где H_0 - величина критического просвета в точке расположения препятствия с относительным расстоянием $K = R_1/R$ (R_1 - расстояние до препятствия) $W_0(\mu)$ определяется по графику (рис. 12); $h = H/H_0$ - относительный просвет над препятствием на интервале.

При расчёте $W_{pi}[\text{дБ}]$ по формуле (16) h берётся со знаком, соответствующим знаку H .

Значения $W_{pi}[\text{дБ}] = -V_p[\text{дБ}]$ могут быть определены непосредственно из графика (рис. 13).

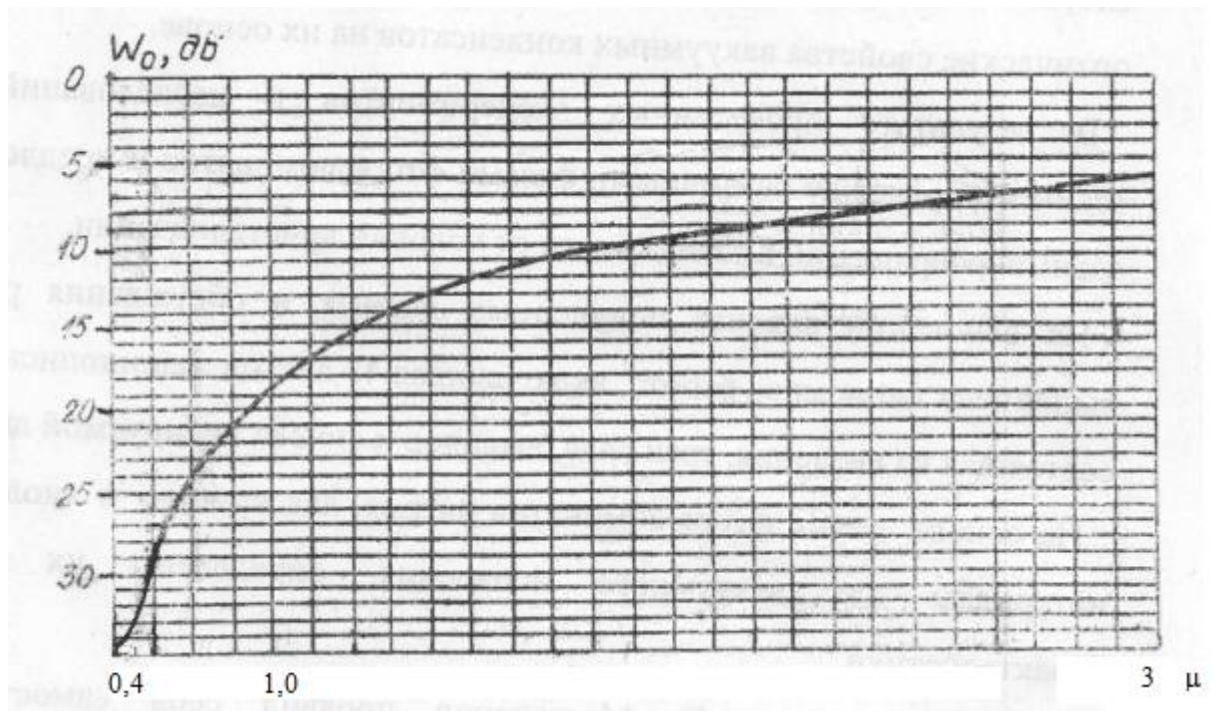


Рисунок 12. Зависимость $W_0(\mu)$ от μ

Расчёт ослабления радиоволн на интервале с несколькими препятствиями производится в следующем порядке:

- определяются геометрические параметры интервала для каждого препятствия R_1 , $R_{пр1}$, R_2 , $R_{пр2}$, h_2 и т. д.;

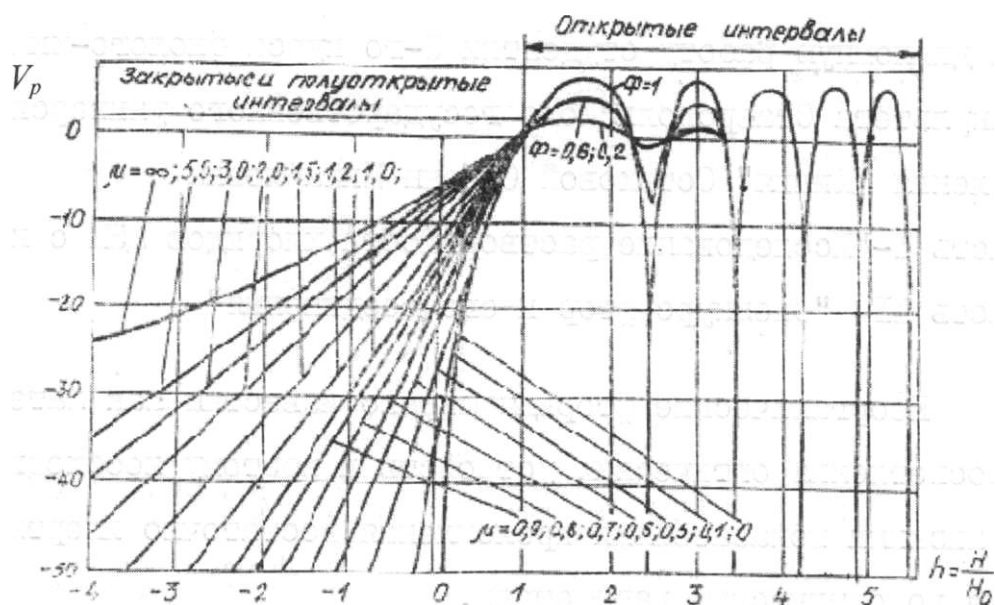


Рисунок 13. Зависимость V_p от h

- находится расстояние $X_{1,2}$ от более пологого препятствия, например, $R_{np1} > R_{np2}$ до точки пересечения скатов препятствий (рис. 14). При этом аппроксимирующие прямые препятствий производятся с помощью шаблонов;
- значение $X_{1,2}$ сравнивается с параметром β , на основе сравнения принимается решение об учёте совместного действия препятствий.

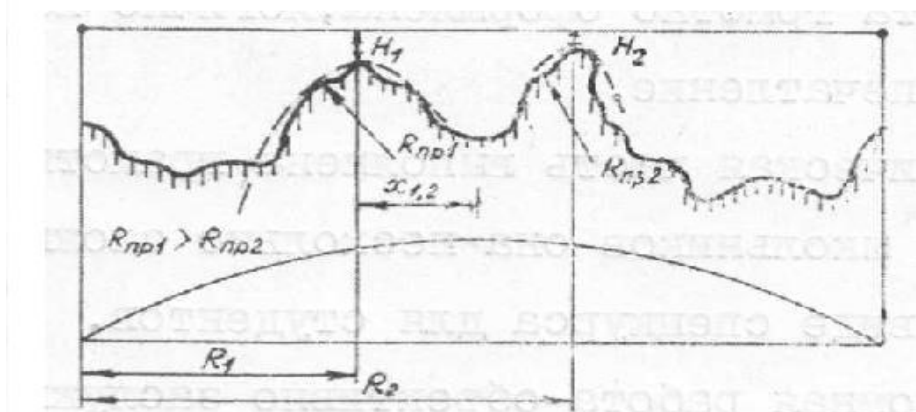


Рисунок 14. Определение точки пересечения скатов препятствий

Препятствия учитываются отдельно, если $X_{1,2} > \beta$, и наоборот, препятствия аппроксимируются одной сферой, для которой определяются геометрические параметры R_1 , R_{np} и h .

Значения β [км] для различных длин волн приведены в таблице 2.

Таблица 2

λ , см	R_{np} , км									
	20	50	100	300	500	1000	3000	5000	6370	10 000
7	0,22	0,63	1,0	2,1	3,0	4,7	9,9	14	16	22
20	0,3	0,8	1,3	2,7	3,8	6,1	12,6	17,7	21	28
60	0,48	1,25	2,0	4,2	6,0	8,0	20	288	33	44
120	0,6	1,6	2,6	5,4	7,6	10,6	25,2	35,4	42	56
240	0,75	2,0	3,3	6,5	6,5	13	32	44	53	70
500	1,0	2,4	4,0	8,1	11,4	15,6	38	53	63	84

Значения β могут быть рассчитаны по формуле (18).

$$\beta = \sqrt[3]{R_{np}^2 \lambda}. \quad (18)$$

Таким образом, ослабление радиоволн для нескольких препятствий рассчитывается:

а) в случае $X_{1,2} < \beta$ - по методике, изложенной для одного препятствия, но с геометрическими параметрами одной эквивалентной сферы;

б) в случае $X_{1,2} > \beta$ - как сумма ослаблений, вносимых каждым препятствием, т. е.
 $W_{pi} = W_{p1} + W_{p2}$. (19)

При этом ослабления W_{p1} и W_{p2} вычисляются с учётом следующих положений: если одна из вершин, например, вершина второго препятствия лежит выше линии прямой видимости, то H_1 отсчитывается от прямой, соединяющей электрический центр антенны A_1 с вершиной второго препятствия (рис. 15).

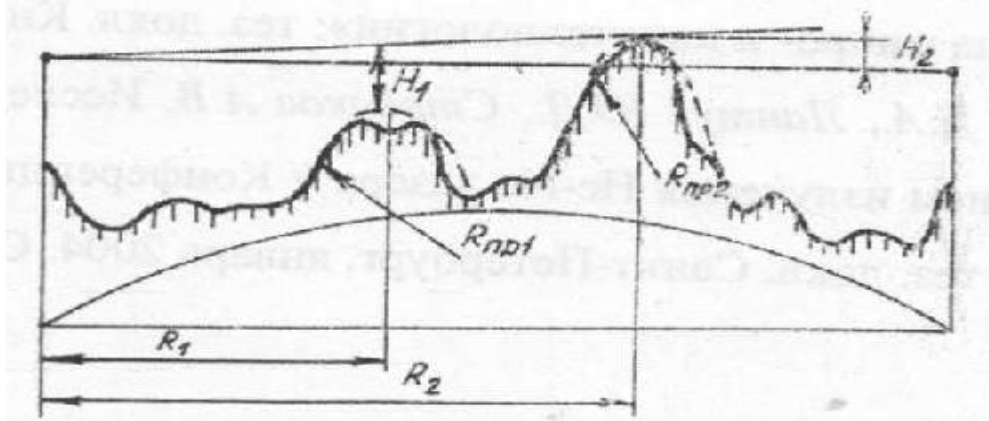


Рисунок 15. Графическая интерпретация определения W_{pi}

Если обе вершины лежат выше линии прямой видимости, то H_1 и H_2 отсчитываются от линий, соединяющих электрические центры антенн с вершиной другого препятствия (рис. 16).

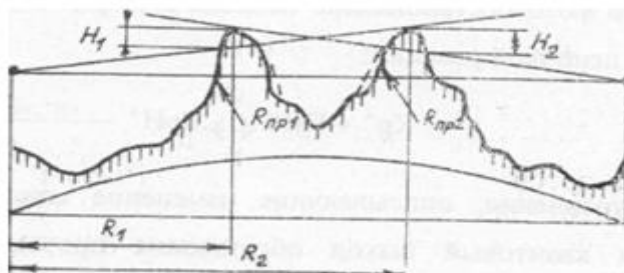


Рисунок 16. Графическая интерпретация определения W_{pi} если обе вершины лежат выше линии прямой видимости

Ослабление радиоволн, вносимое рельефом местности, на открытых интервалах

Ослабление рельефом W_{pi} на открытых интервалах определяется в соответствии с выражением (20).

$$W_{pi}[\text{дБ}] = -10 \lg(1 + \Phi_{\text{эф}}^2 - 2\Phi_{\text{эф}} \cos \pi/3h^2), \quad (20)$$

где $\Phi_{\text{эф}}$ - эффективный коэффициент отражения от поверхности Земли в области отражения. $\Phi_{\text{эф}}$ в зависимости от типа поверхности в точке отражения и диапазона используемых частот приведены в таблице 3; h - относительный просвет в точке отражения.

Таблица 3

Тип поверхности	Коэффициент $\Phi_{\text{эф}}$		
	$L = 7 \text{ см}$	$L = 20 \text{ см}$	$L = 50 \text{ см}$
Водная	0,8 - 0,95	0,9 - 0,95	0,9 - 0,95
Равнина, пойменный луг	0,8	0,8 - 0,9	0,9
Сухая почва, пески	0,3 - 0,5	0,4 - 0,6	0,6 - 0,7
Равнинные участки средне пересеченной местности	0,4 - 0,6	0,6 - 0,8	0,8 - 0,9
Лес	0,3 - 0,4	0,8	0,9

Из выражения (20) видно, что значения W_{pi} могут в зависимости от $\Phi_{эф}$ и h находиться в пределах от -3 дБ (при $\Phi=1$ и $\cos\pi/3h^2 = -1$), что соответствует увеличению уровня сигнала в точке приёма по сравнению с прямым лучом в два раза, до бесконечно большого значения $W_{pi} \rightarrow \infty$ при $\Phi=1$ и $\cos\pi/3h^2 = 1$ (случай компенсации поля прямой волны полем отражённой волны). W_{pi} можно определить непосредственно по графику (рис.13).

Значения коэффициента отражения $\Phi_{эф}$ принимаются равными «нулю» и соответственно ослабление равно нулю, если:

- перепады высот Δh между отдельными препятствиями превышают величину $(0,3+0,5) H_0$ при расстоянии Δr между вершинами препятствий не более 1 - 3 км, а пересечённый участок имеет протяжённость R_0 не менее $0,3R$ (рис. 17). Такую местность называют шероховатой;

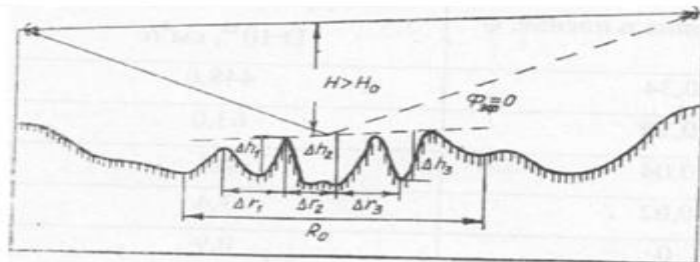


Рисунок 17

- прямая А'Б, проходящая через точку отражения (рис. 18) пересекает неровности поверхности или местные предметы (эффект экранирования);

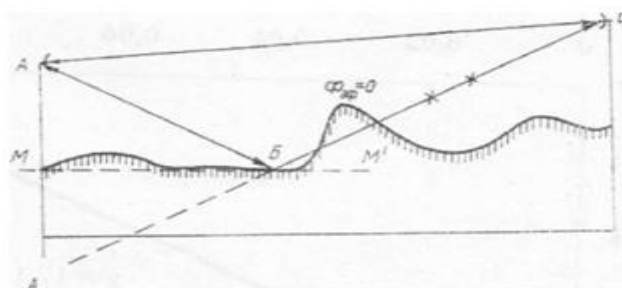


Рисунок 18

- точка отражения В лежит вне областей, способных к отражению (рис.19);

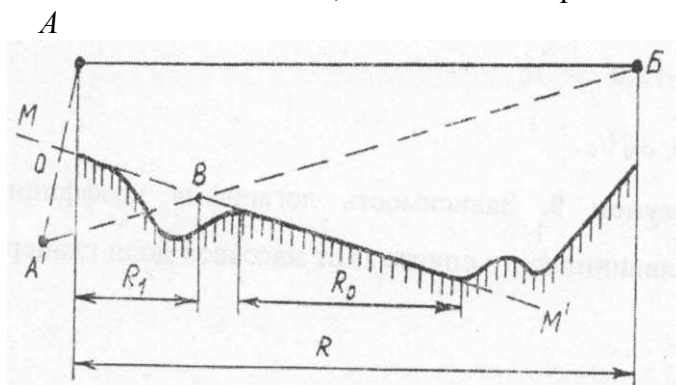


Рисунок 19

- протяжённость отражающей области менее 4 км. Эффективно отражающие площадки соизмеримы с размерами минимальных зон отражения $0,38R$.

При определении относительного просвета $h = H/H_0$ находится точка отражения радиоволны на интервале. Методика нахождения точки отражения зависит от формы отражающей поверхности. Точка отражения от плоской площадки, параллельной линии прямой видимости, находится на середине интервала (рис. 20).

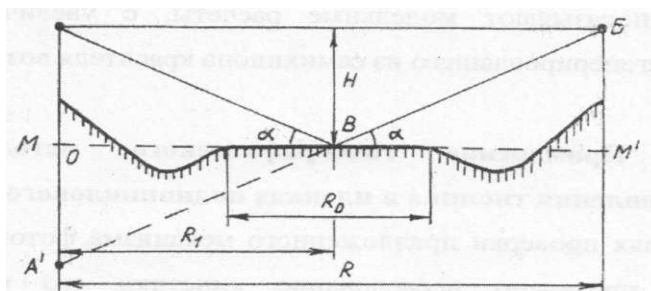


Рисунок 20

Точка отражения от плоской площадки, не параллельной линии прямой видимости, находится путём дополнительных геометрических построений (рис. 21).

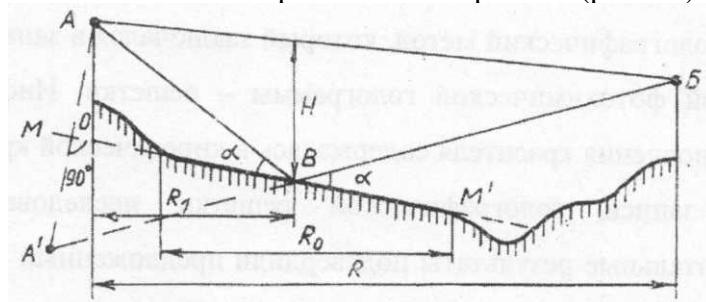


Рисунок 21

Точка отражения от сферической поверхности определяется из равенства углов падения и отражения (рис. 22).

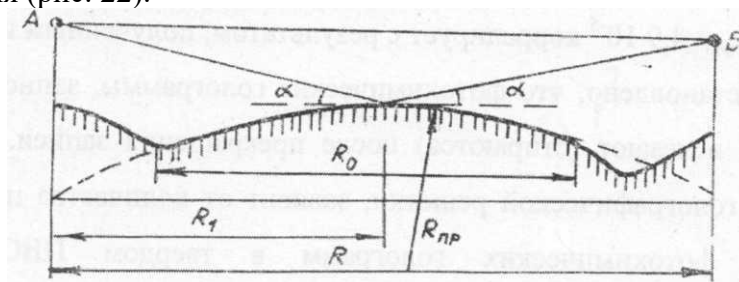


Рисунок 22

Расчет медианной мощности сигнала на входе приемника интервала РРЛ

Величина медианной мощности сигнала на входе приёмника интервала РРЛ, т. е. мощность сигнала при отсутствии замираний, находится из первого уравнения передачи (1) при известных энергетических параметрах и медианном ослаблении на интервале РРЛ.

Медианное ослабление на интервалах РРЛ определяется как сумма ослабления сигнала свободным пространством и прилегающей поверхностью Земли, рассмотренные в предыдущем параграфе.

Расчет реальной чувствительности приемника на интервале РРЛ

Под реальной чувствительностью $R_{\text{рч.пр}}$ приёмника интервала РРЛ понимается мощность радиосигнала, которая должна быть подана на вход приёмника данного интервала для обеспечения требуемого (нормированного) качества связи на интервале и в линии в целом. Реальная чувствительность зависит от режима работы РРЛ, т. е. вида сигнала, передаваемого по линии.

Реальная чувствительность $R_{\text{рч.пр}}$ при передаче телефонных сигналов определяется с учётом следующих исходных данных:

- требований к шумовой защищённости $a_{\text{ш}}$;
- требований к надёжности связи по замираниям $N\%$;

- максимального числа интервалов в линии М.

Расчёт $P_{рч.пр}$ производится при допущениях:

- все интервалы линии одинаковы по медианному ослаблению;

- законы распределения и параметры замираний на всех интервалах тождественны и соответствуют, приведённым на рис. 2;

- замирания сигналов на интервалах независимы, т. е. нормированный процент времени замираний на одном интервале $T_1\%$ с допустимым временем замираний в линии в целом $T\%$ связан соотношением (8).

Величина $P_{рч.пр}$ определяется из соотношений связывающих мощность тепловых шумов в канале ТЧ одного интервала с мощностью сигнала на входе приёмника. Такие соотношения имеют вид:

- для интервала РРЛ с ЧРК-ЧМ

$$P_{шт} = \frac{\Pi_{ш} k T \Delta F_k}{P_{пр}} \left(\frac{F_N}{\Delta f_k} \right)^2 P_c K_{пс}^2 \mu_{пр}; \quad (21)$$

- для интервала РРЛ с ФИМ-АМ

$$P_{шт} = \frac{1,2 \Pi_{ш} k T \Delta F_k}{P_{пр.ср}} \frac{\tau_0 N_k}{\Delta t_m^2 \Delta F_{вф}} P_c K_{пс}^2, \quad (22)$$

где $\Pi_{ш}$ - коэффициент шума приёмника; kT - $4 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц; ΔF_k - полоса ЭППЧ $\Delta F_k = 3,1$ кГц; F_N - средняя частота верхнего в групповом спектре канала; P_c - номинальная мощность телефонного сигнала на выходе канала ТЧ; $K_{пс}$ - психометрический коэффициент шума $K_{пс} = 0,75$; $\beta_{пр}$ - коэффициент предсказаний $\beta_{пр} = 0,4$; $P_{пр}$, $P_{пр.ср}$ - соответственно мощности сигналов на входе приёмников ЧРК-ЧМ и ФИМ-АМ; τ_0 - длительность радиоимпульса на входе приёмника; Δt_m - девиация импульсов; $\Delta F_{вф}$ - полоса пропускания видеофильтра приёмника, согласованного с длительностью принимаемых видеоимпульсов; N_k - число каналов; Δf_k - девиация частоты на один канал.

Выражения (21) и (22) позволяют рассчитать необходимую мощность сигнала на входе приёмника $P_{рч.пр}$ по нормированному значению мощности тепловых шумов на одном интервале $P_{шт1}$ или, соответственно, из требуемой шумовой защищённости по тепловым шумам на одном интервале $a_{шт1}$.

$$a_{шт1} = \frac{P_c}{P_{шт1}}. \quad (23)$$

Таким образом, учтя выражение (23), для РРЛ с ЧРК-ЧМ:

$$P_{рч.пр} = a_{шт1} \Pi_{ш} k T \Delta F_k \left(\frac{F_N}{\Delta f_k} \right) K_{пс}^2 \beta_{пр}; \quad (24)$$

для РРЛ с ФИМ-АМ:

$$P_{рч.пр} = 1,2 a_{шт1} \Pi_{ш} k T \Delta F_k N_k \frac{\tau_0}{\Delta t_m^2 \Delta F_{вф}} K_{пс}^2. \quad (25)$$

Требования к $a_{шт1}$ пересчитываются из норм к шумовой защищённости РРЛ $a_{ш}$ по следующему алгоритму: мощность шумов на выходе канала ТЧ РРЛ складывается из тепловых шумов, шумов нелинейных переходов и аппаратурных шумов:

$$P_{ш} = P_{шт} + P_{шнл} + P_{ш ап}. \quad (26)$$

Накопление шумов в линии зависит от типа указанных шумов. Накопление тепловых и аппаратурных шумов подчиняется аддитивному закону, т. е.

$$P_{шт} = \sum_{i=1}^M P_{шти}, \quad (27)$$

$$P_{шап} = \sum_{k=1}^{M_{ТЧ}} P_{шапк}, \quad (28)$$

где $P_{шти}$ - мощность тепловых шумов, вносимая i -м интервалом; M - число интервалов в линии; $P_{шапк}$ - мощность аппаратных шумов на k -м переприёмном участке по ТЧ; $M_{ТЧ}$ - число переприёмных участков по ТЧ.

Накопление шумов нелинейных переходов подчиняется более сложным законам.

При расчёте реальной чувствительности приёмника отказываются от точного учета механизмов накопления шумов, пользуясь тем обстоятельством, что доля аппаратных шумов и шумов нелинейных переходов невелика по сравнению с тепловыми шумами в момент глубоких замираний. Соотношение между $P_{шт}$ и $P_{ш}$ имеет вид

$$P_{шт} = \alpha P_{ш}, \quad (29)$$

где α - для РРЛ с ЧРК-ЧМ с числом каналов $N_k \leq 12$ $\alpha = 0,85 - 0,95$; $12 < N_k < 60 \Rightarrow \alpha = 0,6 + 0,4$; для РРЛ с ФИМ-АМ $\alpha = 0,85 - 0,95$.

Норма на шумовую защищённость на одном интервале многоинтервальной РРЛ с замираниями имеет вид

$$a_{шт1} = \frac{1}{\alpha} a_{ш} \left[1 + \frac{(M-1)f(\sigma)}{W_3(T\%)} \right]. \quad (30)$$

Следовательно, $P_{рч.пр}$ вычисляется из соотношений:

для РРЛ с ЧРК-ЧМ:

$$P_{рч.пр} = \frac{1}{\alpha} a_{ш} \left[1 + \frac{(M-1)f(\sigma)}{W_3(T\%)} \right] P_{ш} kT \Delta F_k \left(\frac{F_N}{\Delta f_k} \right)^2 K_{пс}^2 \beta_{пр}; \quad (31)$$

для РРЛ с ФИМ-АМ:

$$P_{рч.пр.ср} = \frac{1,2}{\alpha} a_{ш} \left[1 + \frac{(M-1)f(\sigma)}{W_3(T\%)} \right] P_{ш} kT \Delta F_k \frac{\tau_0 N_k}{\Delta t_m^2 \Delta F_{вф}} K_{пс}^2; \quad (32)$$

для РРЛ $f(\sigma) \approx 1$.

Расчет реальной чувствительности приемника РРС при передаче цифровых радиосигналов

Реальная чувствительность приёмника РРС в этом режиме определяется скоростью передачи сигналов, методом манипуляции несущей (АМ, ЧМ, ФМ, ОФМ), способом обработки сигналов в приёмнике (когерентная, некогерентная), требованиями к достоверности передачи и др.

При когерентном приёме реальная чувствительность $P_{рч}$ вычисляется для одного интервала с учетом требований к достоверности $P_{ош}$, которые определяются выражением

$$P_{ош} = \frac{1}{2} [1 - \Phi(\gamma h)], \quad (33)$$

где $\Phi(\gamma h)$ - функция Крампа, значения которой для различных значений γh приводятся в математических справочниках; h - отношение сигнал/шум на входе решающей схемы, равное

$$h = \frac{P_c}{\Pi_{\text{ш}} k T \Delta f_{\text{пр}}}, \quad (34)$$

где P_c - реальная чувствительность приёмника; $\Delta f_{\text{пр}}$ - полоса пропускания приёмника $\Delta f_{\text{пр}} = B = 1/\tau_{\text{и}}$; $\tau_{\text{и}}$ - длительность символа; B - скорость передачи;

$\Pi_{\text{ш}}$ - коэффициент шума приёмника;

γ - коэффициент, зависящий от метода манипуляции: для ФМ $\gamma = \sqrt{2}$, для ЧМ

$\gamma = 1$, для АМ $\gamma = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

При известном методе манипуляции и заданной вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ на интервале РРЛ можно определить требуемое отношение сигнал\шум на входе решающей схемы «h» по графику зависимости $P_{\text{ош}} = f(\gamma h)$.

Определив необходимое значение h из выражения (34) можно определить требуемый уровень сигнала на входе приёмника P_c , т. е. его реальную чувствительность $P_{\text{рч}}$

$$P_c = P_{\text{рч}} = h \Pi_{\text{ш}} k T \Delta f_{\text{пр}}. \quad (35)$$

Следует иметь в виду, что накопление ошибок в линии происходит аддитивно, т. е.

$$P_{\text{ош}\Sigma} = \sum_{i=1}^M P_{\text{ош}i},$$

где $P_{\text{ош}i}$ - вероятность ошибок на i -м интервале, и принимая во внимание, что вероятность ошибок на интервале с замираниями на несколько порядков выше, чем на интервалах без замираний, можно считать вероятность ошибки во всей линии равной вероятности ошибки на интервале с замираниями. Поэтому необходимый уровень сигнала на входе приёмника (его реальная чувствительность) на одном интервале должна быть меньше медианного уровня сигнала на входе приёмника, обеспеченная энергетикой интервала, на величину запаса уровня сигнала на замирания. Величина этого запаса определяется по $N\%$ надёжности связи.

В технических данных для отдельных цифровых РРЛ как отечественного, так и иностранного производства, приводятся нормы реальной чувствительности приёмника $P_{\text{рч}}$ в децибелах по отношению к 1 мВт $P_{\text{рч}}$ (дБм), при которой обеспечивается норма на вероятность ошибки $T_{\text{ош}}=10^{-3}$. Поэтому в этих случаях нет необходимости производить расчёт реальной чувствительности по формуле (35).

Определение запаса ВЧ уровня q_i и надёжности связи на интервале РРЛ

Определение запаса уровня q_i производится в соответствии с формулой (36).

$$q_i [\text{дБ}] = P_{\text{пр.мед}} [\text{дБ/Вт}] - P_{\text{рч.пр}} [\text{дБ/Вт}], \quad (36)$$

где $P_{\text{пр.мед}}$ - медианная мощность на входе приёмника; $P_{\text{рч.пр}}$ - реальная чувствительность приёмника.

Определение надёжности связи на интервале $N_i\% = 100 - T_i\%$ производится по полученным значениям q_i по графикам $T_i\% = f(q_i = W_3)$ (рис. 2).

Вывод о пригодности РРЛ делается на основании сравнения полученной потери надёжности на каждом интервале РРЛ $T_i\%$ с допустимой потерей надёжности на интервалах РРЛ $T\%/M$. Если $T_i\% \leq T\%/M$, то интервал считается пригодным для обеспечения связи с заданным качеством.

Пример расчета РРЛ

Исходные данные

Произвести расчёт участка РРЛ протяжённостью $L_{\text{уч}}=500$ км, который будет наращиваться до линии полной протяжённости $L=1000$ км, по исходным данным:

1. Тип РРЛ - ФИМ-АМ;
2. Число каналов $N_k = 24$;
3. Диапазон используемых частот - 2 ГГц;
4. Энергетические параметры:
- мощность передатчика (средняя) $P_{\text{ПЕР}} = 4$ Вт;

- коэффициент усиления антенн $G_{A.ПЕР} = G_{A.ПР} = 25$ дБ;
- ослабление фидерных трактов $W_{Ф.ПЕР} = W_{Ф.ПР} = 6$ дБ;
- коэффициент шума приемника $\Pi_{ш} = 10$ дБ.
- 5. Девиация импульсов $\Delta t_m = 1$ мкс;
- 6. Групповая частота следования импульсов $F_N = 192$ кГц;
- 7. Длительность импульсов $\tau_0 = 0,4$ мкс;
- 8. Полоса пропускания тракта ПЧ $\Delta f_{ПЧ} = 7$ МГц;
- 9. Полоса пропускания видеофильтра $\Delta F_{ВФ} = 1,5$ МГц;
- 10. Среднее расстояние на интервале $R = 33$ км;
- 11. Максимальное расчетное число интервалов в линии полной протяженности $M =$

30.

12. Требования к качеству связи: $a_{ш} = 36$ дБ; $H\% = 95\%$ ($T\% = 5\%$).

Расчёт интервалов РРЛ

Расчёт ослабления радиоволн на i -м интервале РРЛ

Геометрические параметры интервала

Из снятого профиля интервала (рис. 23) имеем:

$R = 40$ км; $H = 8$ м; $R_1 = 16$ км; $K = R_1/R = 16/40 = 0,4$.

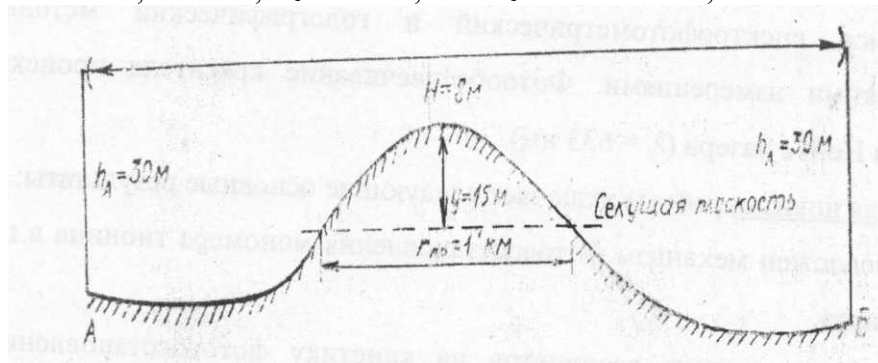


Рисунок 23. Профиль снятого интервала

Определяем радиус препятствия на интервале расчетным путем:

$$R_{пр} = \frac{r_{пр}^2}{8Y}.$$

По рисунку профиля интервала определяем $r_{пр}$ и Y , $r_{пр} = 11$ км, $Y = 15$ м.

$$R_{пр} = \frac{11^2}{8 \cdot 15 \cdot 10^{-3}} \approx 1000 \text{ км}.$$

Определяем по рисунку профиля просвет $H = 8$ м. Критический просвет на интервале в точке препятствия:

$$H_0 = \sqrt{\frac{0,15 \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 0,4(1 - 0,4)}{3}} = 23 \text{ м}.$$

Так как $0 < H < H_0$, интервал считается полуоткрытым. Ослабление свободного пространства на трассе интервала определяет из выражения:

$$W_{свi}[\text{дБ}] = 122 + 20 \lg \frac{R[\text{км}]}{\lambda[\text{см}]} = 122 + \lg \frac{40}{15} = 130 \text{ дБ}.$$

Ослабление рельефом местности для полуоткрытых интервалов определяем из выражения

$$W_{pi}[\text{дБ}] = W_0(\mu)(1 - h),$$

где

$$\mu = \sqrt[3]{\frac{R^2 K^2 (1 - K)^2}{R_{\text{пр}} H_0}} = \sqrt[3]{\frac{(40)^2 \cdot (0,4)^2 \cdot (0,6)^2}{1000 \cdot 23 \cdot 10^{-3}}} \approx 1,6;$$

$$h = \frac{H}{H_0} = \frac{8}{23} = 0,35.$$

По графику $W_0=f(\mu)$ (рис.12) определяем $W_0(\mu)$. Его величина составляет 10 дБ. Тогда, ослабление рельефом местности на интервале трассы составляет:

$$W_{pi} [\text{дБ}] = 10(1 - 0,35) = 6,5 \text{ дБ}.$$

Медианное ослабление на интервале составляет:

$$W_i [\text{дБ}] = W_{Cbi} + W_{pi} = 130 + 6,5 = 136,5 \text{ дБ}.$$

Медианная мощность на входе приёмника i -го интервала определяем из выражения:

$$P_{\text{пр.мед.}i} = P_{\text{пер}} [\text{дБ/Вт}] + 2G_A [\text{дБ}] - 2W_{\Phi} [\text{дБ}] - W_i [\text{дБ}] = 6 + 2 \cdot 25 - 2 \cdot 6 - 136,5 = -92,5 [\text{дБ/Вт}].$$

Реальную чувствительность приёмника определяем из выражения:

$$P_{\text{рч.пр.ср}} = 1,2 a_{\text{ш}} \frac{1}{\alpha} \left[1 + \frac{(M-1)}{W_3(T_1\%)} \right] \Pi_{\text{ш}} kT \Delta F_k \frac{\tau_0 N_k}{\Delta t_m^2 \Delta F_{\text{ВФ}}} K_{\text{пс}}^2.$$

Или в логарифмических единицах:

$$P_{\text{рч.пр.ср}} \left[\frac{\text{дБ}}{\text{Вт}} \right] = a_{\text{ш}} [\text{дБ}] + 10 \lg \frac{1,2}{\alpha} \left[1 + \frac{M-1}{W_3(T_1\%)} \right] + \Pi_{\text{ш}} [\text{дБ}] + 10 \lg(kT \Delta F_k) + \\ + 10 \lg \left(\frac{\tau_0 N_k}{\Delta t_m^2 \Delta F_{\text{ВФ}}} \right) + 10 \lg K_{\text{пс}}^2,$$

где для линии полной протяженности $M=33$:

$$T_1\% = T\%/M = 5\%/33 = 0,16\%;$$

$$a = 0,94; a_{\text{шПС}} = 36 \text{ дБ}.$$

Величина $W_3(T_1\%)$ для $T_1\% = 0,16\%$ по графику $W_3f(T_1\%)$ (рис. 2) равна 21 дБ, или $W_3(0,16)$ в натуральных числах $W_3(0,16) = 120$. Тогда

$$P_{\text{рч.пр.ср}} = 36 \text{ дБ} + 10 \lg \frac{1,2}{0,9} \left[1 + \frac{32}{120} \right] + 10 \text{ дБ} + 10 \lg 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 3,1 \cdot 10^3 + \\ + 10 \lg \frac{0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 24}{(10^{-6})^2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6}} + 10 \lg (0,75)^2 = -115,4 \frac{\text{дБ}}{\text{Вт}}.$$

Запас высокочастотного уровня на i -м интервале составляет:

$$q_i = P_{\text{пр.мед.}i} - P_{\text{рч.пр.ср}} = -92,5 \text{ дБ/Вт} - (-115,4 \frac{\text{дБ}}{\text{Вт}}) = 22,9 \text{ дБ}.$$

По графику (рис. 2) для $q_i = 22,9 \text{ дБ}$ имеем $T_1\% = 0,11\%$.

Вывод. Рассчитываемая величина потери надёжности на i -м интервале $T_1\% = 0,11\%$ меньше допустимой её величины $T_1\% = 0,16\%$.

Следовательно, на данном интервале связь может быть обеспечена с требуемым качеством.

Указания по технике безопасности

1. К проведению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.

2. Включение лабораторных установок (компьютеров) осуществляется только с разрешения преподавателя.

3. При проведении лабораторной работы не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.

4. Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов лабораторных установок (компьютеров).

5. При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.

6. В аудитории запрещается пользоваться источниками открытого огня. При возгорании оборудования его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.

7. При возникновении непредвиденных лабораторной работой неисправностей, а также в случае появлении запаха, свидетельствующего о возгорании электрических проводов или радиокомпонентов, следует незамедлительно прекратить работу с установкой, выключив ее из сети и обратиться к обслуживающему персоналу.

8. По окончании работы с лабораторным оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задание по выполнению лабораторной работы:

1. Изучить теоретический материал по учебным вопросам 1 - 4.
2. Провести расчет РРЛ по приведенному примеру.
3. Провести расчет РРЛ по индивидуальному заданию. Исходные данные для расчета выдает преподаватель.

4. Ответить на контрольные вопросы.

4. Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета по лабораторной работе:

1. Титульный лист (образец представлен в Приложении 1).
2. Цель занятия.
3. Основные теоретические положения, изучаемого материала. Выводы по ним, подчеркивающих суть, изучаемого вопроса.
4. Перечень практических заданий. По каждому заданию представляются расчеты, обоснования (результаты исследований) и выводы по ним.

Примечание: Максимальное количество баллов студент получает, если оформление отчета соответствует установленным требованиям, а отчет полностью раскрывает суть лабораторной работы. Основанием для снижения оценки являются:

- наличие ошибок, не искажающих сути, рассматриваемого вопроса;

- небрежный отчет.

Отчет может быть отправлен на доработку в следующих случаях:

- неправильные расчеты (ошибки допущенные при проведении исследований);

- не обоснованные (ошибочные) выводы;

- не полностью выполненная работа.

Контрольные вопросы:

1. Общие положения по расчету РРЛ.
2. Исходные данные для расчета РРЛ.
3. Требования к качественным характеристикам каналов РРЛ.
4. Порядок расчета РРЛ.
5. Расчет ослабления радиоволны на интервале РРЛ.
6. Построение чертежей профилей местности на интервалах РРЛ.
7. Влияние земной поверхности на распространение радиоволн на интервалах РРЛ.
8. Расчёт ослабления, вносимого рельефом местности, на полукоткрытых и закрытых интервалах.
9. Ослабление радиоволн, вносимое рельефом местности, на открытых интервалах.
10. Расчет медианной мощности сигнала на входе приемника интервала РРЛ.
11. Расчет реальной чувствительности приемника на интервале РРЛ.
12. Расчет реальной чувствительности приемника РРС при передаче цифровых радиосигналов.
13. Определение запаса ВЧ уровня q_i и надежности связи на интервале РРЛ.

Список рекомендованной литературы:

1. Велигоша А.В. Лабораторный практикум по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».
2. Велигоша А.В. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студента по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».

Практическая работа 4.

Моделирование и исследование процесса распространения радиоволн на спутниковых радиолиниях.

Цель работы: Получить практические навыки в энергетическом расчете спутниковых линий связи.

Учебные вопросы:

1. Особенности энергетики спутниковых линий. Цели и задачи расчета.
2. Уравнения связи для двух участков.
3. Обобщенное уравнение линии и системы связи.

1. Особенности энергетики спутниковых линий. Цели и задачи расчета.

Линии спутниковой связи состоят из двух участков: Земля - спутник и спутник - Земля. В энергетическом смысле оба участка весьма напряженные: первый - из-за тенденции к уменьшению мощности передатчиков и упрощению земных станций, второй - из-за ограничений на массу, габаритные размеры и энергопотребление бортового ретранслятора, лимитирующих его мощность. Основная особенность спутниковых линий - наличие больших потерь сигнала, обусловленных затуханием его энергии на трассах большой физической протяженности. Так, при высоте орбиты ИСЗ, равной 36 тыс. км, затухание сигнала может достигать 200 дБ. Помимо этого основного затухания в пространстве сигнал в линиях спутниковой связи подвержен влиянию большого числа других факторов, таких как поглощение в атмосфере, фарадеевское вращение плоскости поляризации, рефракция, деполяризация и т. д. С другой стороны, на приемное устройство спутника и земной станции кроме собственных флуктуационных шумов воздействуют разного рода помехи в виде излучения космоса (Солнца и планет). В этих условиях правильный и точный учет влияния всех факторов позволяет осуществить оптимальное проектирование системы, обеспечить ее уверенную работу в наиболее трудных условиях и в то же время исключить излишние энергетические запасы, приводящие к неоправданному увеличению сложности земной и бортовой аппаратуры.

Поскольку нормы на некоторые качественные показатели спутниковых каналов (например отношение сигнал/шум) имеют статистический характер, это заставляет оценивать возмущающие факторы также статистически, т. е. при расчетах вводить не только количественную меру воздействия того или иного фактора, но и вероятность (частоту) его появления. Необходимо учитывать характер и число передаваемых сигналов, а также характер их преобразования (обработки) в спутниковом ретрансляторе. В простейшем случае, например, при передаче программ телевидения, бортовой ретранслятор работает в односигнальном режиме, типичном для наземных радиорелейных линий, и лишь усиливает ретранслируемый сигнал. При передаче телефонных сигналов с многостанционным доступом через бортовой ретранслятор проходит несколько циклов, разделенных по частоте, времени или форме и оказывающих взаимное влияние, которое должно учитываться при расчете энергетики спутниковых линий. При этом в зависимости от типа и назначения системы на борту может применяться та или иная обработка сигнала, вплоть до его полной регенерации, исключающей накопление шумов и искажений, возникающих на каждом из участков трассы.

В настоящей лабораторной работе рассматривается методика, позволяющая выполнить расчет спутниковых линий, как в односигнальном, так и в многосигнальном режимах. Применительно к односигнальному режиму расчет целесообразно проводить по участкам (вопрос 2), а в многосигнальном режиме - либо по участкам, либо с помощью обобщенного уравнения (вопрос 3), учитывающего все эффекты и факторы, сопутствующие прохождению нескольких сигналов через общий тракт бортового ретранслятора.

2. Уравнения связи для двух участков

Структурная схема одного участка линии связи и диаграмма уровней сигнала приведены на рисунке 1.

Эквивалентная изотропно-излучаемая мощность (ЭИИМ) передающей станции определяется

$$\text{ЭИИМ} = P_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{пер}}$ - эффективная мощность сигнала на выходе передатчика; $\eta_{\text{пер}}$ - коэффициент передачи (по мощности) волнового тракта (КПД тракта) между передатчиком и антенной; $G_{\text{пер}}$ - коэффициент усиления передающей антенны относительно изотропного излучателя.

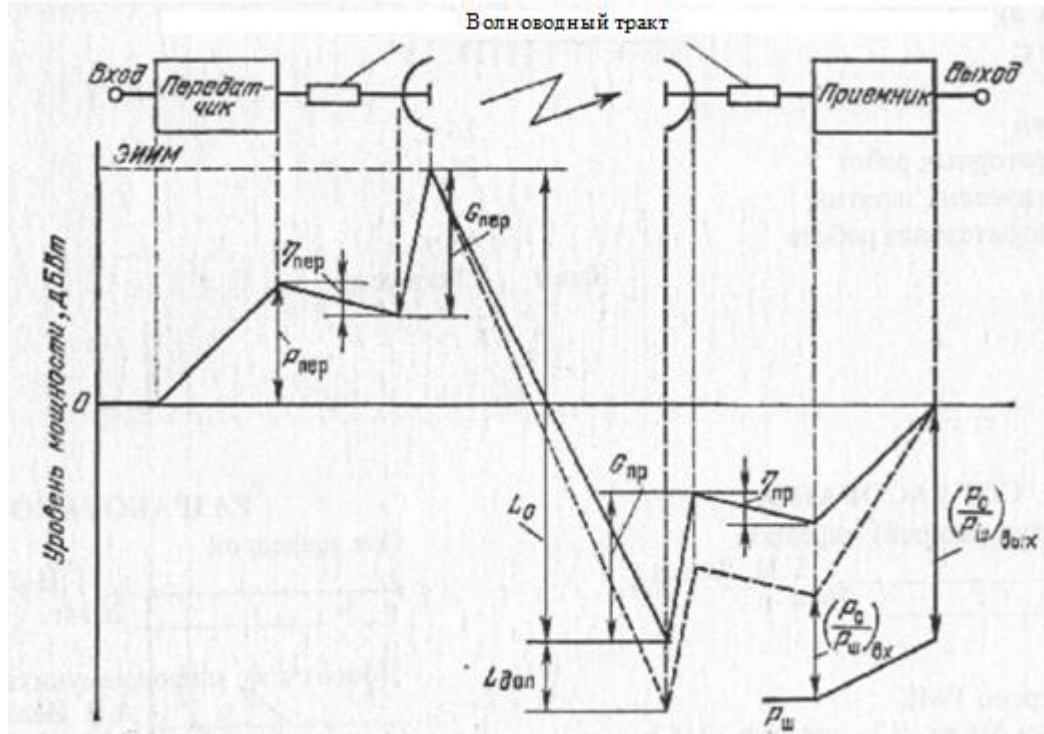


Рисунок 1. Структурная схема и диаграмма уровней одного участка линии связи

Эквивалентная изотропно-излучаемая мощность - произведение мощности радиочастотного сигнала, подводимого к антенне, на абсолютный коэффициент усиления антенны.

ЭИИМ - интегральная характеристика "энергетики" радиостанции (радиопередатчика, соединенного фидерным трактом с антенной), равная мощности, которую должен излучать изотропный излучатель, чтобы на одинаковом удалении плотность потока мощности создаваемого им радиоизлучения равнялась плотности потока мощности радиоизлучения, создаваемого данной радиостанцией в направлении максимума диаграммы направленности ее антенны. ЭИИМ измеряется в единицах мощности (Вт, дБВт).

Можно сказать, что маломощный радиопередатчик с направленной антенной может создать в некотором направлении такой же уровень радиоизлучения, что и мощный радиопередатчик со слабонаправленной антенной.

Затухание энергии в свободном пространстве, определяемое уменьшением плотности потока мощности при удалении от излучателя:

$$L_0 = 16\pi^2 d^2 / \lambda^2 \quad (2)$$

где λ - длина волны; d - наклонная дальность (расстояние между передающей и приемной антеннами).

Кроме этих основных потерь, на трассе присутствуют и дополнительные потери $L_{\text{доп}}$; полное значение потерь на трассе $L\Sigma = L_0 L_{\text{доп}}$.

В точке приема установлена антенна с коэффициентом усиления $G_{\text{пр}}$, связанная с приемником волноводным трактом с коэффициентом передачи $\eta_{\text{пр}}$. При согласовании

волновых сопротивлений антенны, элементов тракта и приемника мощность сигнала на входе приемника определяется

$$P_{\text{пр}} = \frac{\text{ЭИИМ}}{L_0 L_{\text{доп}}} G_{\text{пр}} \eta_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} \lambda^2 G_{\text{пр}} G_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} \eta_{\text{пер}}}{16 \pi^2 d^2 L_{\text{доп}}}.$$

В таком виде полученное выражение представляет собой известную формулу, применяемую для расчета радиолиний прямой видимости.

Когда параметры антенны заданы в виде эффективной площади ее апертуры $S_{\text{пр}}$, связанной с коэффициентом усиления соотношением

$$G_{\text{пр}} = \frac{4 \pi S_{\text{пр}}}{\lambda^2},$$

предыдущее выражение может быть представлено в виде

$$P_{\text{пер}} = P_{\text{пр}} \frac{4 \pi d^2 L_{\text{доп}}}{G_{\text{пер}} S_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}}}. \quad (3)$$

Формула (3) позволяет определить необходимую мощность передатчика по заданному значению мощности сигнала на входе приемника. Отметим, что в нее не входит длина волны λ . Следовательно, когда передающая антенна имеет постоянный коэффициент усиления на всех частотах, а приемная - постоянную эффективную площадь апертуры (может эффективно работать по мере возрастания частоты), мощность сигнала на входе приемника в первом приближении не зависит от частоты (в действительности некоторая зависимость от частоты имеется, так как $L_{\text{доп}}$ в значительной степени определяется диапазоном частот).

При расчете линии часто оказывается заданной не мощность сигнала на входе приемника, а отношение сигнал/шум на входе приемника $(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вх}}$, тогда в формулу (3) следует подставить $P_{\text{пр}} = P_{\text{ш}}(P_c/P_{\text{ш}})_{\text{вх}}$, где $P_{\text{ш}}$ - полная мощность шума на входе приемника.

Поскольку в диапазонах частот, где работают спутниковые системы, шумы, создаваемые различными источниками, имеют аддитивный характер, их суммарная мощность выражается формулой

$$P_{\text{ш}} = k T_{\Sigma} \Delta f_{\text{ш}}, \quad (4)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт/Гц · град - постоянная Больцмана; T_{Σ} - эквивалентная шумовая температура всей приемной системы с учетом внутренних и внешних шумов; $\Delta f_{\text{ш}}$ - эквивалентная (энергетическая) шумовая полоса приемника.

Структурная схема и диаграмма уровней линии спутниковой связи, состоящей из двух участков, приведены на рисунке 2. Воспользовавшись формулами (1), (4), для этих участков можно записать следующие соотношения:

- для участка «Земля - спутник» (здесь и далее всем показателям, относящимся к земной аппаратуре, присваивается индекс «з», а показателям, относящимся к бортовой аппаратуре - индекс «б»; величины, относящиеся к участку «Земля - спутник», имеют индекс «1», относящиеся к участку «спутник - Земля» - индекс «2».

$$P_{\text{пер.з}} = \frac{16 \pi^2 d_1^2 L_{1\text{доп}} P_{\text{ш.б}}}{\lambda_1^2 G_{\text{пер.з}} G_{\text{пр.б}} \eta_{\text{пер.б}} \eta_{\text{пр.б}}} \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.б}},$$

где $P_{\text{ш.б}} = k T_{\Sigma\text{б}} \Delta f_{\text{ш.б}}$;

- для участка «спутник - Земля»

$$P_{\text{пер.б}} = \frac{16 \pi^2 d_2^2 L_{2\text{доп}} P_{\text{ш.з}}}{\lambda_2^2 G_{\text{пер.б}} G_{\text{пр.з}} \eta_{\text{пер.б}} \eta_{\text{пр.з}}} \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{вх.з}},$$

где $P_{\text{ш.з}} = k T_{\Sigma\text{з}} \Delta f_{\text{ш.з}}$.

Чтобы перейти от уравнений для отдельных участков к общему уравнению для всей линии, необходимо установить связь между отношениями сигнал/шум на выходе линии и на каждом из участков. Как указано в вопросе 1, при отсутствии обработки сигнала на борту происходит сложение шумов каждого из участков; при этом суммарное отношение сигнал/шум на конце линии связи

$$(P_{\text{ш}}/P_c)_{\Sigma} = (P_{\text{ш}}/P_c)_{\text{вх.б}} + (P_{\text{ш}}/P_c)_{\text{вх.з}}. \quad (5)$$

Очевидно, что отношение сигнал/шум на каждом из участков должно быть выше, чем на конце линии:

$$(P_{\text{ш}}/P_c)_{\text{вх.б}} = a(P_{\text{ш}}/P_c)_{\Sigma}; \quad (P_{\text{ш}}/P_c)_{\text{вх.з}} = b(P_{\text{ш}}/P_c)_{\Sigma}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) следует, что

$$a = b/(b - 1).$$

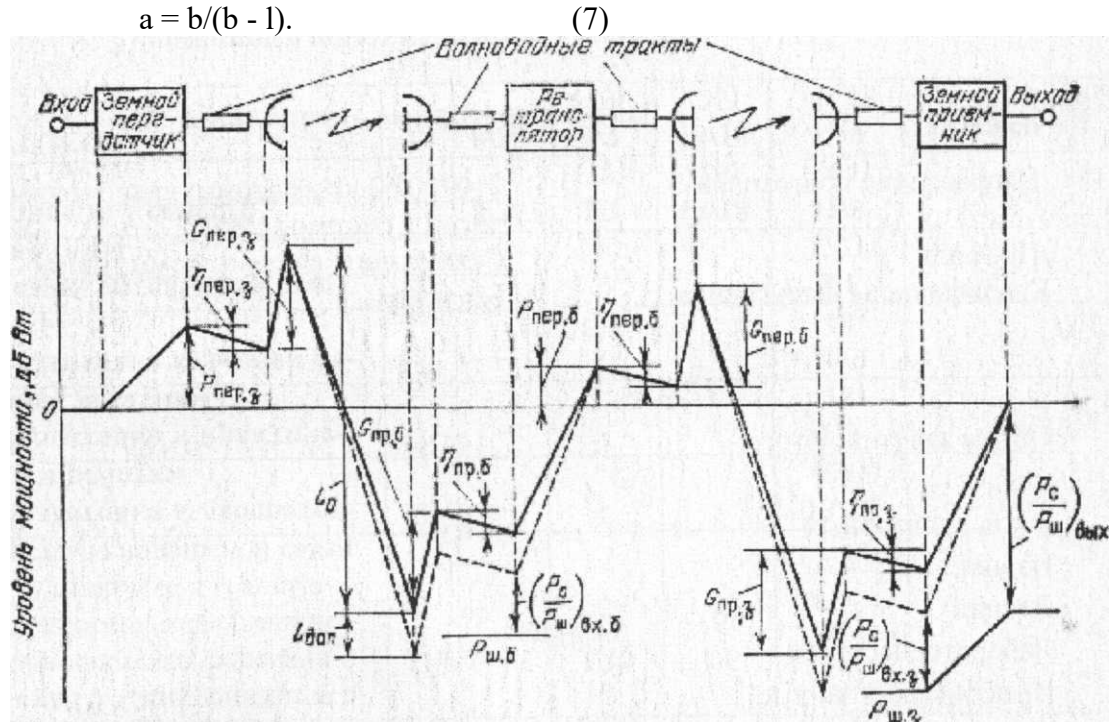


Рисунок 2. Структурная схема и диаграмма уровней линии связи из двух участков

Выражение (7) позволяет распределить заданное отношение $(P_c/P_{\text{ш}})_{\Sigma}$ по двум участкам линии связи. Например, задавшись превышением отношения сигнал/шум на участке, «спутник - Земля», равным 1 дБ ($b = 1,26$), найдем, что необходимое превышение на участке «Земля - спутник» должно составлять 7 дБ ($a \approx 5$). Приведенное распределение коэффициентов запаса a и b предполагает, что полосы шумов бортового ретранслятора и земного приемника равны; если $\Delta f_{\text{ш.з}} < \Delta f_{\text{ш.б}}$, то мощность шума на входе бортового приемника следует вычислять в полосе $\Delta f_{\text{ш.з}}$.

С учетом изложенного уравнения для линии спутниковой связи, состоящей из двух участков, окончательно примут вид:

- для участка «земля - спутник»

$$P_{\text{пер.з}} = \frac{16\pi^2 d_1^2 L_{1\text{доп}} k T_{\Sigma 6} \Delta f_{\text{ш.з}}}{\lambda_1^2 G_{\text{пер.з}} G_{\text{пр.б}} \eta_{\text{пер.б}} \eta_{\text{пр.б}}} a \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\Sigma}, \quad (8)$$

- для участка «спутник - Земля»

$$P_{\text{пер.б}} = \frac{16\pi^2 d_2^2 L_{2\text{доп}} k T_{\Sigma 3} \Delta f_{\text{ш.з}}}{\lambda_2^2 G_{\text{пер.б}} G_{\text{пр.з}} \eta_{\text{пер.б}} \eta_{\text{пр.з}}} \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\Sigma}. \quad (9)$$

3. Обобщенное уравнение линии и системы связи

Для решения задач, связанных с оптимизацией параметров спутниковых систем, и обоснованного распределения затуханий и шумов по участкам линии связи целесообразно использовать обобщенное энергетическое уравнение, связывающее параметры обоих участков.

Применительно к односигнальному режиму работы ретранслятора оно может быть получено на основе следующих соотношений. Мощность сигнала передающей земной станции на входе бортового приемника

$$P_{\text{с.вх.б}} = \frac{\text{ЭИИМ}_3}{L_{\Sigma 1} L_{\text{доп}}} G_{\text{пр.б}} \eta_{\text{пр.б}}. \quad (10)$$

Поскольку выходная мощность ретранслятора в односигнальном режиме расходуется на передачу только сигнала и шума, то доля бортовой ЭИИМ, приходящаяся на излучение сигнала,

$$\text{ЭИИМ}_{б.с} = \frac{\text{ЭИИМ}_б P_{с.вх.б}}{P_{с.вх.б} + P_{ш.б}} \approx \text{ЭИИМ}_б,$$

так как $P_{с.вх.б} \gg P_{ш.б}$, а доля ЭИИМ, приходящая на излучение шума,

$$\text{ЭИИМ}_{б.ш} = \text{ЭИИМ}_б \cdot P_{ш.б} / (P_{с.вх.б} + P_{ш.б}) \approx \text{ЭИИМ}_б P_{ш.б} / P_{с.вх.б} \quad (11)$$

Мощность сигнала ИСЗ на входе приемника земной станции

$$P_{с.вх.з} = \frac{\text{ЭИИМ}_{б.с} \eta_{пр.з} G_{пр.з}}{L_{\Sigma 2}}. \quad (12)$$

Мощность шума от ИСЗ (шума участка «Земля - ИСЗ») на входе приемника земной станции

$$P_{ш.з-б} = \frac{\text{ЭИИМ}_{ш.б} \eta_{пр.з} G_{пр.з}}{L_{\Sigma 2}}. \quad (13)$$

Мощность собственных шумов приемной станции $P_{ш.з}$, а результирующее отношение сигнал/шум на входе приемной станции

$$(P_c/P_{ш})_{\Sigma} = \frac{P_{с.вх.б}}{(P_{ш.з-б} + P_{ш.з})}. \quad (14)$$

Подставляя в (14) значения из (10) - (13), после преобразований получим

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{\Sigma} = \frac{\text{ЭИИМ}_з \text{ЭИИМ}_б \eta_{пр.з} G_{пр.б} \eta_{пр.б}}{\text{ЭИИМ}_з G_{пр.б} \eta_{пр.б} P_{ш.з} L_{\Sigma 2} + \text{ЭИИМ}_б G_{пр.з} \eta_{пр.з} P_{ш.б} L_{\Sigma 1}}. \quad (15)$$

Аналогично можно получить обобщенное энергетическое уравнение для системы спутниковой связи, состоящей из n земных станций, работающих через общий ствол бортового ретранслятора.

Структурная схема такой системы приведена на рисунке 3. Передатчик земной станции излучает сигнал в сторону ИСЗ; мощность этого сигнала на входе спутникового ретранслятора определяется формулой (10). Одновременно с этим сигналом на вход ретранслятора воздействуют сигналы других $n - 1$ земных станций системы, которые для первого сигнала представляются помехой, а также флуктуационный шум участка «Земля - спутник». Полная мощность помех на входе ретранслятора

$$P_{п.б} = \sum_{i=1}^{n-1} s p P_{ci} + P_{ш.б}, \quad (16)$$

где s - коэффициент, учитывающий относительное различие мощности мешающих сигналов; p - коэффициент, учитывающий время существования мешающих сигналов.

Аддитивная смесь сигнала, помех и шума усиливается в общем тракте ретранслятора и излучается в сторону земных станций системы. Однако наличие в тракте ретранслятора элементов с нелинейными амплитудными и фазовыми характеристиками, а также элементов с АМ-ФМ преобразованием приводит в общем случае к подавлению сигнала и появлению соответствующих помех P_n и $P_{ам-фм}$, которые также излучаются ретранслятором.

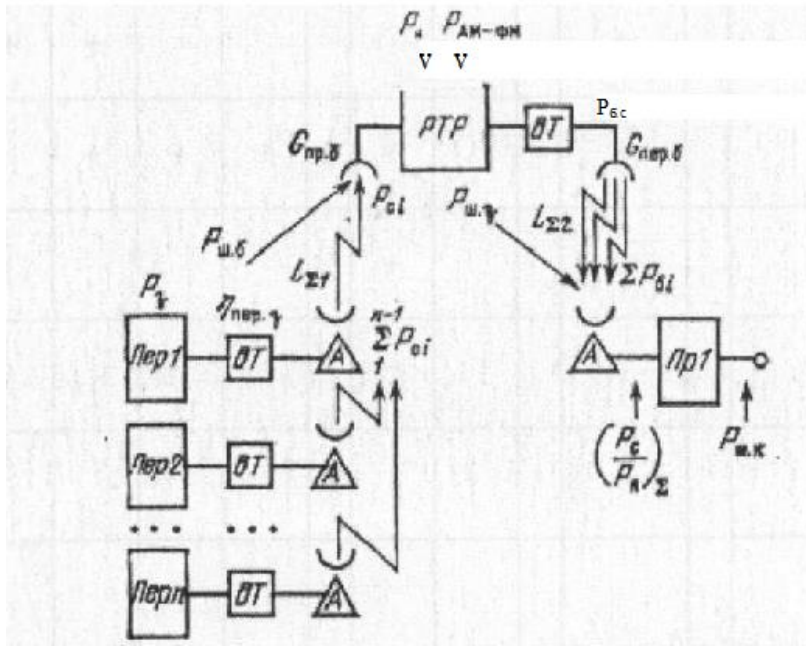


Рисунок 3. Структурная схема многостанционной системы связи

Выходная мощность ретранслятора, приходящаяся на сигнал одной станции определяется

$$P_{б.i} = \frac{c P_6 P_{с.вх.б} K_{п}}{P_{с.вх.б} + P_{п.б} + P_{н}p + P_{АМ-ФМ}} = \frac{c P_6 K_{п}^p ЭИИМ_3 G_{пр.б}}{L_{\Sigma 1} \sum P_{п}}, \quad (17)$$

где

$$\sum P_{п} = \sum_{i=1}^n s p P_{ci} + P_{ш.б} + P_{н}p + P_{АМ-ФМ};$$

где c - коэффициент использования выходной мощности ретранслятора в многосигнальном режиме; $K_{п}$ - коэффициент подавления сигнала помехой.

Остальная часть мощности ретранслятора расходуется на излучение других сигналов и помех.

Обобщенное уравнение, связывающее энергетические параметры многостанционной системы спутниковой связи,

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{\Sigma} = \frac{ЭИИМ_3 ЭИИМ_6 \eta_{пр.з} G_{пр.б} \eta_{пр.б} G_{пр.з}}{L_{\Sigma 1} L_{\Sigma 2}} \times \\ \times \frac{\left(\frac{ЭИИМ_6 c \eta_{пр.з} G_{пр.з}}{L_{\Sigma 2}} + P_{ш.з} \right) \left[\sum_{i=n}^n \frac{ЭИИМ_3 G_{пр.б} \eta_{пр.б}}{L_{\Sigma 1}} + P_{ш.б} + P_{н}p + P_{АМ-ФМ} \right]}{cl}, \quad (18)$$

где l - коэффициент, учитывающий ослабление помех путем частотной и (или) временной селекции в приемнике земной станции.

В этом уравнении первый сомножитель определяет мощность сигнала на входе приемника, а второй - содержит все составляющие помех, возникающих при многостанционном доступе.

Полученное выражение является общим для всех методов разделения сигналов в ретрансляторе; специфика каждого метода учитывается в (18) соответствующими коэффициентами. Например, при временном разделении выходная мощность ретранслятора используется полностью, каждый сигнал занимает всю полосу частот приемника и помехи в виде соседних сигналов не совпадают по времени с основным сигналом; следовательно, $c = 1$, $l = 1$, $p = 0$; при частотном разделении $c < 1$, $p = 1$ и $l \approx 1/n$.

Указания по технике безопасности

1. К проведению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.

2. Включение лабораторных установок (компьютеров) осуществляется только с разрешения преподавателя.

3. При проведении лабораторной работы не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.

4. Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов лабораторных установок (компьютеров).

5. При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.

6. В аудитории запрещается пользоваться источниками открытого огня. При возгорании оборудования его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.

7. При возникновении непредвиденных лабораторной работой неисправностей, а также в случае появлении запаха, свидетельствующего о возгорании электрических проводов или радиокомпонентов, следует незамедлительно прекратить работу с установкой, выключив ее из сети и обратиться к обслуживающему персоналу.

8. По окончании работы с лабораторным оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задание по выполнению лабораторной работы:

1. Изучить теоретический материал по учебным вопросам 1 - 3.

2. Провести энергетический расчет спутниковой линии связи. Исходные данные для расчета выдает преподаватель.

3. Ответить на контрольные вопросы.

4. Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета по лабораторной работе:

1. Титульный лист (образец представлен в Приложении 1).

2. Цель занятия.

3. Основные теоретические положения, изучаемого материала. Выводы по ним, подчеркивающих суть, изучаемого вопроса.

4. Перечень практических заданий. По каждому заданию представляются расчеты, обоснования (результаты исследований) и выводы по ним.

Примечание: Максимальное количество баллов студент получает, если оформление отчета соответствует установленным требованиям, а отчет полностью раскрывает суть лабораторной работы. Основанием для снижения оценки являются:

- наличие ошибок, не искажающих сути, рассматриваемого вопроса;
- небрежный отчет.

Отчет может быть отправлен на доработку в следующих случаях:

- неправильные расчеты (ошибки допущенные при проведении исследований);
- не обоснованные (ошибочные) выводы;
- не полностью выполненная работа.

Контрольные вопросы:

1. Общие положения по энергетическому расчету спутниковых линий связи.

2. Исходные данные для расчета спутниковых линий связи.

3. Порядок расчета спутниковых линий связи.

4. Особенности энергетики спутниковых линий. Цели и задачи расчета.

5. Уравнения связи для двух участков.

6. Обобщенное уравнение линии и системы связи.

Список рекомендованной литературы:

1. Велигоша А.В. Лабораторный практикум по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».

2. Велигоша А.В. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студента по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».

Практическая работа 5.

Моделирование и исследование параметров и характеристик антенн.

Цель лабораторной работы:

1. Ознакомление с теоретическими основами и принципом работы симметричной и несимметричной вибраторной антенны.
2. Формирование умений по расчету и построению диаграмм направленности (ДН) и определению основных параметров направленного действия вибраторных антенн с использованием специального программного обеспечения.
3. Формирование навыков измерения ДН штыревых антенн.

Учебные вопросы:

1. Характеристики и принцип работы симметричных и несимметричных вибраторов.
2. Исследование вибраторных антенн.

Теоретические сведения

1. Характеристики и принцип работы симметричных и несимметричных вибраторов.

Графическое изображение характеристики направленности называют диаграммой направленности антенны. Пространственная диаграмма направленности, изображаемая в виде некоторой поверхности $f(\varphi, \theta)$, представляет собой объёмную фигуру. На практике, обычно пользуются плоскостными диаграммами направленности, изображающими зависимость величины напряжённости поля от направления в одной из двух главных плоскостей. Главными плоскостями для антенн, излучающих линейно поляризованные волны, называются плоскости, в которых лежит либо вектор $\vec{E}$ (плоскость электрического вектора), либо вектор $\vec{H}$ (плоскость магнитного вектора) излученного поля.

Двухмерная диаграмма направленности антенны может строиться как в полярной, так и в прямоугольной системе координат (рисунок 1). При построении диаграммы направленности в полярной системе координат (рисунок 1, а) из полюса (начало координат) под различными углами θ или φ откладывают радиус-вектор, длина которого пропорциональна напряжённости поля (или излучаемой мощности) в направлении данного радиуса, а затем концы этих радиус-векторов соединяют плавной кривой.

В прямоугольной системе координат (рисунок 1, б) по оси абсцисс откладываются углы θ или φ , характеризующие направление излучения в соответствующей плоскости, а по оси ординат - величина напряжённости поля или излучаемой мощности.

Диаграммы направленности, выполненные в полярной системе координат, отличаются большей наглядностью. В прямоугольной системе координат можно выбрать любой масштаб по обеим осям и более четко выявить структуру сложных диаграмм, растянув их вдоль оси абсцисс. Обычно широкие диаграммы направленности строят в полярной, а узкие - в прямоугольной системе координат.

Для суждения о направленных свойствах антенны представляют интерес не абсолютные значения параметров электромагнитного поля, а их относительное распределение. Поэтому, на практике, наиболее широко используют нормированные характеристики направленности, в которых величины напряжённости поля или мощности выражены относительно их максимального значения: $F(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) / f_{\max}(\theta, \varphi)$. У нормированных диаграмм направленности максимальное значение всегда равно единице (рисунок 1, б).

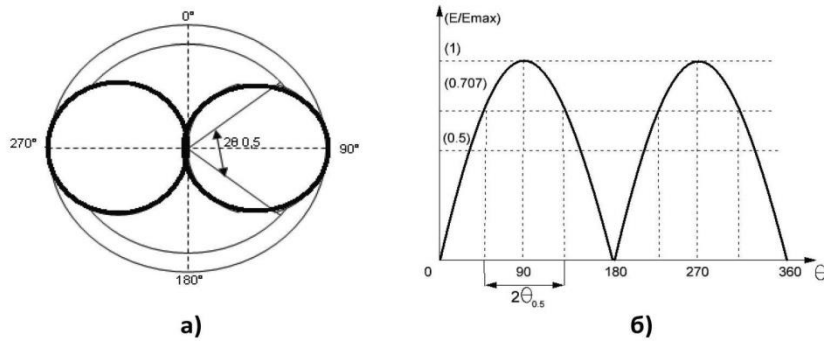


Рисунок 1. Диаграммы направленности полуволнового вибратора в полярной (а) и прямоугольной (б) системах координат

Шириной диаграммы направленности по половинной мощности $2\theta_{0,5} (2\varphi_{0,5})$ называют угол между направлениями, вдоль которых напряженность поля уменьшается в 0,707 раз по сравнению с максимальной напряженностью поля (рисунок 1). Если снята диаграмма направленности по мощности, то ширина диаграммы определяется на уровне половины от максимальной мощности.

Для антенн, располагающихся вблизи земной поверхности, обычно пользуются определениями вертикальной (относительно земли) и горизонтальной поляризации. Поляризация характеризует ориентацию вектора $\vec{E}$ в пространстве, через который проходит и плоскость поляризации. Так называемый вертикальный вибратор (относительно земли) излучает и принимает вертикально поляризованные волны (ВПВ), а горизонтальный вибратор - горизонтально поляризованные волны (ГПВ) (рисунок 2).

Важными характеристиками антенны, связанными с диаграммой направленности, являются: коэффициент направленного действия (КНД) и коэффициент усиления (КУ).

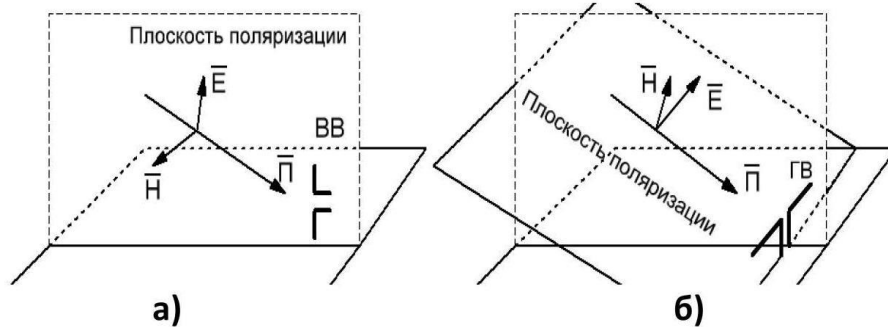


Рисунок 2. Виды линейной поляризации: а) вертикальная; б) горизонтальная

Коэффициентом направленного действия $D(\theta, \varphi)$ называется отношение мощности $P(\theta, \varphi)$, излучаемой антенной в единицу телесного угла в некотором направлении к средней мощности P_Σ , излучаемой антенной по всем направлениям:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_\Sigma}{4\pi}} \quad (1.1)$$

КНД может быть определен по ДН антенны по мощности:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4P(\theta, \varphi)}{\iint_{00}^{2\pi\pi} P(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi} = \frac{4f(\theta, \varphi)}{\iint_{00}^{2\pi\pi} P(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi} \quad (1.2)$$

Как правило, в качестве характеристики антенны используют максимальное значение КНД:

$$D_{\max} = \frac{4\pi}{\iint_{00}^{2\pi\pi} f(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi} \quad (1.3)$$

При этом угловая зависимость КНД восстанавливается очевидным образом:

$$D(\theta, \varphi) = D_{\max} \times f(\theta, \varphi).$$

Поскольку, определение ДН антенны во всем пространстве практически невозможно, иногда используют в качестве характеристики антенны КНД, рассчитанный по главному лепестку:

$$D_{\text{эл}} = 4\pi \int_{\Omega_{\text{эл}}} f(\theta, \varphi) d\Omega \quad (1.4)$$

где Ω - угловой сектор, занимаемый главным лепестком ДН.

Значения КНД у разных антенн составляет от 1,5 - для элементарного диполя, 1,64 - для полуволнового вибратора и до величин порядка 10^8 - для больших зеркальных антенн миллиметрового диапазона.

Коэффициент усиления $G(\theta, \varphi)$ учитывает потери в антенне, характеризуемые коэффициентом полезного действия (КПД) $\eta = P_{\text{и}} / P_{\text{вх}}$ - отношение излучаемой мощности $P_{\text{и}}$ к мощности, подводимой к антенне $P_{\text{вх}}$. По определению, КУ показывает, во сколько раз должна быть увеличена входная мощность при замене реальной направленной антенны с потерями на ненаправленную антенну без потерь, при условии сохранения неизменной величины плотности потока мощности в данном направлении.

КНД, КУ и КПД антенны связаны соотношением:

$$G(\theta, \varphi) = \eta \times D(\theta, \varphi) \quad (1.5)$$

Иногда усиление антенны характеризуют таким параметром, как эффективная площадь $S_{\text{эфф}}$. Эффективная площадь антенны связана с КНД соотношением:

$$S_{\text{эфф}} = \lambda^2 / 4\pi \times D \quad (1.6)$$

Симметричные вибраторы относятся к простейшим антеннам. Они широко используются не только самостоятельно, в составе различных линий связи, но и как элементы более сложных антенных систем. Они нашли широкое применение в диапазоне КВ и УКВ. Конструктивно представляют собой два проводника одинаковой длины, между которыми включается питающая линия - фидер, соединяющая антенну с передатчиком. Следует учитывать, что свойства любой антенны сохраняются как при ее работе в качестве приемной, так и передающей, если передатчик и приемник подключены с помощью фидера к одним и тем же входным зажимам антенны.

Входное сопротивление симметричного вибратора, в общем случае, имеет как активную, так и реактивную составляющие. При длине вибратора, равной или кратной половине длины волны, его реактивное сопротивление обращается в нуль. Такая длина вибратора называется резонансной.

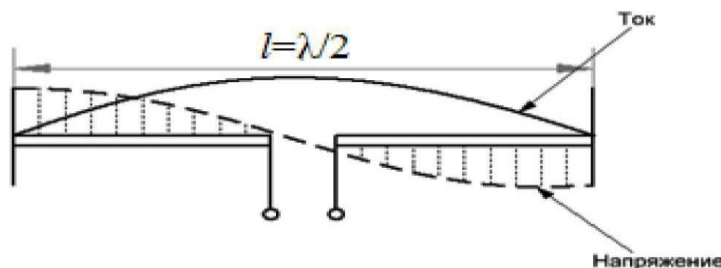


Рисунок 3. Полуволновый вибратор, распределение тока и напряжения

Вдоль полуволнового вибратора устанавливается половина волны тока и напряжения (рисунок 3).

При изменении частоты принимаемого сигнала величина ЭДС на выходе симметричного вибратора также будет изменяться. Это обусловлено, во-первых, изменением реактивной части входного сопротивления антенны, во-вторых, изменением характеристики направленности. Если, поддерживая мощность источника сигнала

постоянной, снять зависимость ЭДС от частоты, мы получим амплитудно-частотную характеристику антенны.

По форме частотной характеристики можно судить о полосе пропускания антенны, о ее диапазонных свойствах.

Резонансные свойства антенны также зависят от величины ее волнового сопротивления, которое, в свою очередь, существенно зависит от диаметра вибратора. С увеличением диаметра уменьшается волновое сопротивление и расширяется полоса пропускания антенны.

Ток вдоль вибратора нельзя считать равномерно распределенным ($I \neq const$), необходимо определить закон изменения тока вдоль вибратора.

Следующее соотношение позволяет построить ненормированную ДН симметричного вибратора, находящегося в свободном пространстве:

$$E_m(\theta) = \frac{60 \cdot I_m}{r} \cdot \left(\frac{\cos\left(\frac{\pi \cdot L}{\lambda} \cdot \cos(\theta)\right) - \cos\left(\frac{\pi \cdot L}{\lambda}\right)}{\sin(\theta)} \right), \quad (1.7)$$

где I_m - амплитуда тока в антенне; r - расстояние до точки наблюдения; L - геометрическая длина антенны; λ - длина волны; θ - переменный угол в вертикальной плоскости пространства в радианах.

Для построения нормированной ДН необходимо $E_m(\theta)$ разделить на $E_{m \max}(\theta)$:

$$F(\theta) = \frac{E_m(\theta)}{E_{m \max}(\theta)}. \quad (1.8)$$

Нормированное выражение для ДН вибраторной антенны в упрощенном виде выглядит:

$$F(\theta) = \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{(1 - \cos kl) \sin \theta} \quad (1.9)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число; l - длина плеча вибратора; θ - переменный угол.

Несимметричный вибратор (штырь) - это антенна, которая располагается в непосредственной близости к поверхности Земли или на проводящем экране перпендикулярно (очень редко - под углом) к этой поверхности. Если поверхность Земли принять за идеально проводящую и принять во внимание зеркальное отображение, то несимметричный вибратор можно считать половиной эквивалентного ему симметричного вибратора (рисунок 4). Исходя из этого предположения рассчитываются все основные характеристики несимметричного вибратора (штыревой антенны).

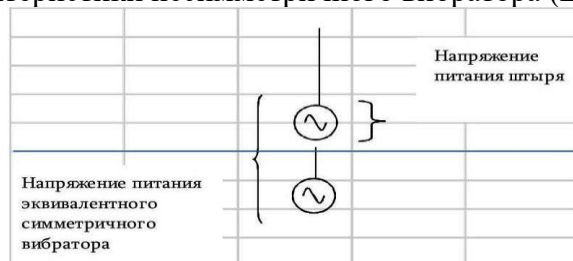


Рисунок 4. Симметричный вибратор, эквивалентный несимметричному

Сопротивление излучения несимметричного вибратора в два раза меньше, чем у эквивалентного симметричного вибратора, поскольку в случае равных величин токов первый излучает в два раза меньшую мощность (нет излучения в нижнее полупространство). Входное сопротивление несимметричного вибратора также в два раза меньше, чем у эквивалентного симметричного, поскольку при одинаковых токах питания

напряжение питания первого в два раза меньше. У несимметричного вибратора коэффициент направленного действия, а следовательно, и коэффициент усиления, в два раза больше, чем у эквивалентного симметричного вибратора, поскольку при равных мощностях излучения первый обеспечивает в два раза большую плотность мощности, и мощность излучается лишь в одно полупространство.

Расчетное задание

1. Рассчитать и построить в декартовой системе координат ненормированные и нормированные ДН двухволновой, волновой, полуволновой и четвертьволновой вибраторной антенны по формулам (1.7 и 1.8); графически определить величины ширины главного лепестка диаграмм направленности. Для упрощения расчетов, в лабораторном практикуме предлагается возможность компьютерного расчета. На панели управления щелкните по иконке (1), после чего запустите симуляционную функцию **Dipole**, щелкнув по иконке (2).



Откроется лицевая панель симуляционной функции **Dipole**, рисунок 5:

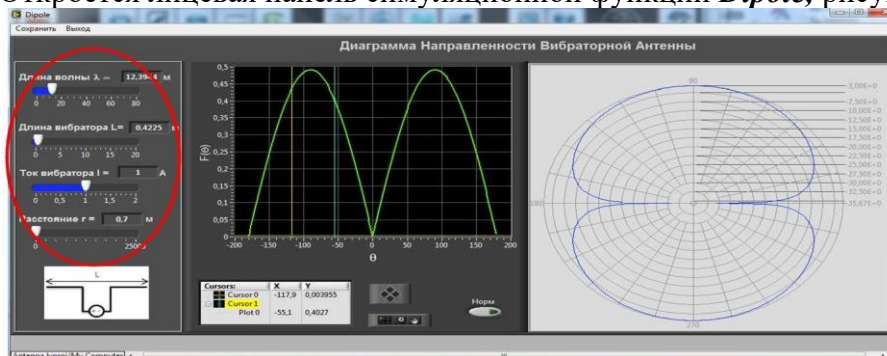


Рисунок 5. Лицевая панель программы

2. Данные для расчета берутся из Таблицы 1 в соответствии с вариантом, номер которого соответствует порядковому номеру фамилии студента в журнале.

Таблица 1

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8
Длина антенны L, м	L	0,3	1	3,3	3,9	2,1	2,7	5,1	2
Ток в антенне, I _m , A	I	3E-2	1E-1	2E-2	4E-3	8E-2	7E-3	9E-4	1
Расстояние r, м	r	1000	800	900	2200	1300	500	1000	7000
	2	2500	3000	2800	1200	4000	1200	1500	4000

Примечание: Все переменные задаются в научной нотации: $1\text{mA} = 1 \cdot 10^{-3} \text{A} = 1\text{E}-3\text{A}$.

Рассчитать частоту колебаний генератора по формуле $f = c/\lambda$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ для длины антенны L (Таблица 1), при которой антенна станет:

1. Четвертьволновым вибратором $L = \lambda/4$.
 2. Полуволновым вибратором $L = \lambda/2$.
 3. Волновым вибратором $L = \lambda$.
 4. Двухволновым вибратором $L = 2\lambda$.
- Рассчитанные данные занести в Таблицу 2.

Таблица 2

L	$L = \lambda/4$	$L = \lambda/2$	$L = \lambda$	$L = 2\lambda$
$\lambda, \text{м}$				
$f = c/\lambda, \text{Гц}$				

Примечание: Все переменные задаются в научной нотации: 1МГц = $=1 \cdot 10^6$ Гц = 1Е6 Гц.

4. Получить ненормированную ДН (для этого, кнопка **Norm** на фронтальной панели симуляционной программы должна быть отключена) симметричного вибратора длиной L , для двух расстояний до точек наблюдения r_1, r_2 и значения тока в антенне I_m (Таблица 1) при длине волны λ , соответствующей длине вибратора $L = \lambda/4$. (Таблица 2). Данные вводить в лицевую панель программы, рисунок 5. После этого на графиках появятся ненормированные ДН в декартовой и полярной системах координат.

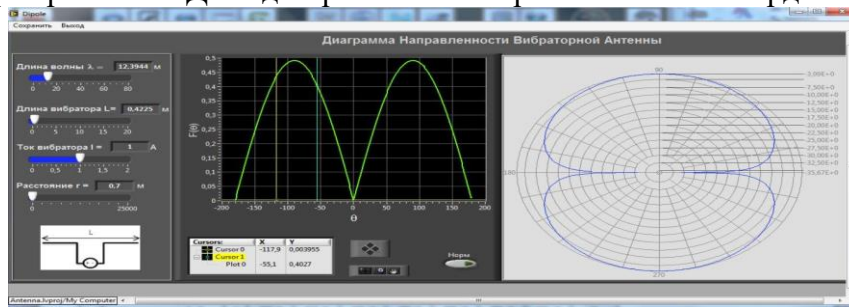
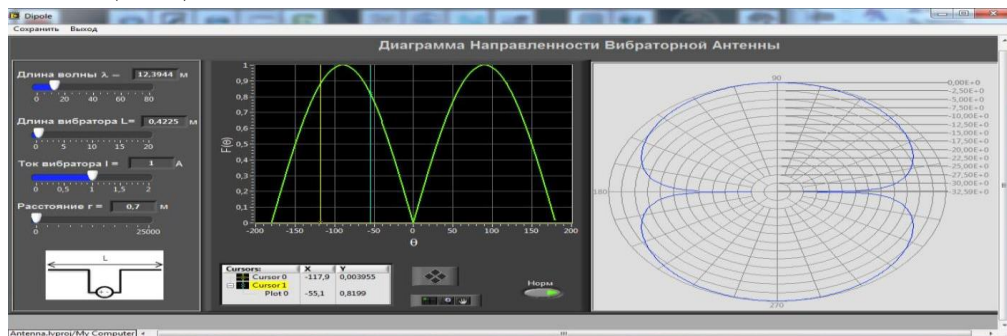


Рисунок 6. Ненормированные ДН

5. Провести аналогичные расчеты для полуволнового $L = \lambda/2$, волнового $L = \lambda$ и двухволнового $L = 2\lambda$ вибратора. Таким образом, необходимо получить восемь ненормированных диаграмм направленности. Используя курсоры, зафиксировать величины E (пиковые значения лепестков ненормированных ДН) для всех восьми случаев и занести их в соответствующие графы Таблица 3 и Таблица 4.

6. Рассчитать (в случае обоих расстояний r_1 и r_2) нормированную ДН (нажать кнопку **Norm** ) для каждого из четырех типов вибраторов, используя те же самые данные из Таблицы 1. Таким образом, необходимо получить еще восемь уже нормированных диаграмм направленности. Определить для каждой полученной нормированной ДН ширину ее главного лепестка (см. раздел 9.2. Определение углового сектора $2\theta_{0,5}$ ($2\varphi_{0,5}$) и уровня первого бокового лепестка диаграммы направленности).



Результаты внести в Таблицу 3 и сделать выводы о зависимости ширины основных лепестков ДН от типа вибраторной антенны.

Таблица 3

Вариант	$L = \lambda/4$	$E_{\max}$	θ_1	θ_2	$2\theta_{0,5}$	Кол-во основных лепестков
L	r_1					

I		r ₂					
r ₁		$L = \lambda/2$					
r ₂		r ₁					
		r ₂					
		$L = \lambda$					
		r ₁					
		r ₂					
		$L = \lambda$					
		r ₁					
		r ₂					

7. В Таблице 4 необходимо записать результаты расчета нормированной ДН штыревой вибраторной антенны ($L = \lambda/4$), которая используется в данном лабораторном практикуме в качестве испытуемой. В качестве исходных данных для расчета использовать указанные в Таблице 4 значения.

Таблица 4

Испытуемая антенна $L = \lambda/4 = 3.1 \text{ см}$	I	E _{max}	θ_1	θ_2	$2\theta_{0,5}$	Кол-во основных лепестков
$r_1 = 1.5 \text{ см}$	10 мА					

8. Запомнить результаты всех расчетов и рисунок ДН для варианта с данными, указанными в Таблица 4. Выйти из симуляционной программы.

2. Исследование вибраторных антенн

Практическое задание по учебному вопросу 2

Измерение ДН в плоскости Е

1. Установить вспомогательную штыревую антенну номер 10 на треногу для вспомогательной антенны (см. раздел. 6.2 Сборка стенда, стр. 12).



2. Подсоединить ее к выходу RF OUT генератора N1 PX1e-5673E (см. раздел 6.3 Сборка контрольно-измерительного оборудования, стр. 13), использовать коаксиальный кабель (14) (см. 4.1. Оборудование стенда, стр. 6). Вспомогательная антенна должна быть в горизонтальном положении. Установить штыревую антенну (9) (см. 4.1. Оборудование стенда, стр. 6) на опорно-поворотное устройство для испытуемой антенны (см. раздел 6.2 Сборка стенда, стр. 12).

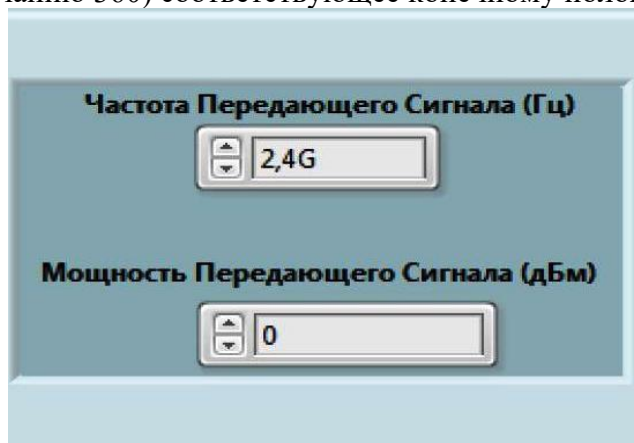
Подсоединить испытываемую антенну к входу RF IN анализатора N1 PX1e-5663E. Использовать коаксиальный кабель (15) (см. 4.1. Оборудование стенда, стр. 6). Испытуемая антенна должна быть в горизонтальном положении.



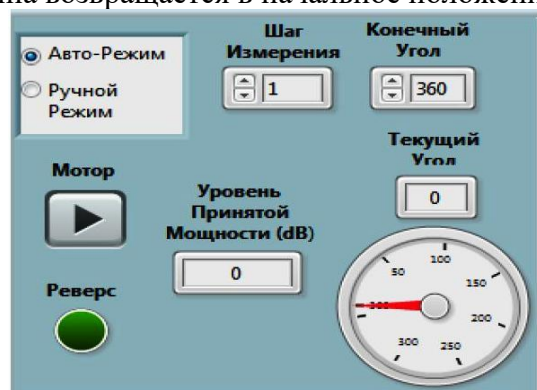
Разнести испытываемую и вспомогательную антенны на расстояние $r = 1,5$ м, причем ориентировать антенны так, чтобы они были направлены друг на друга соосно. Важно также, чтобы точки подключения к фидерам испытываемой и вспомогательной антенн находились на одинаковой высоте.

4. На лицевой панели в поле Частота Передающего Сигнала ввести $f = 2,4$ GHz, а в поле Мощность Передающего Сигнала - 0 дБм.

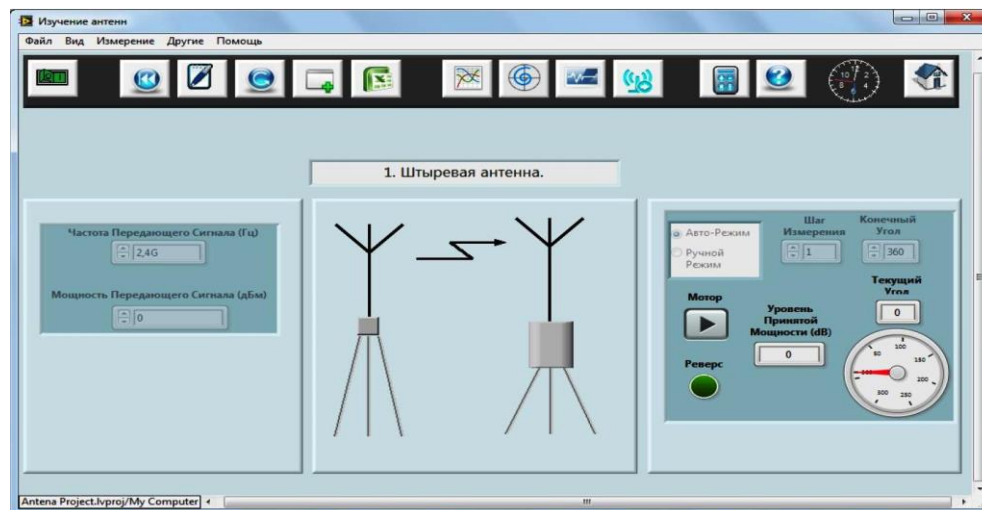
В поле Шаг измерения ввести необходимое значение (по умолчанию 1), соответствующее шагу измерения, в градусах, а в поле Конечный Угол ввести значение (по умолчанию 360) соответствующее конечному положению антенны.



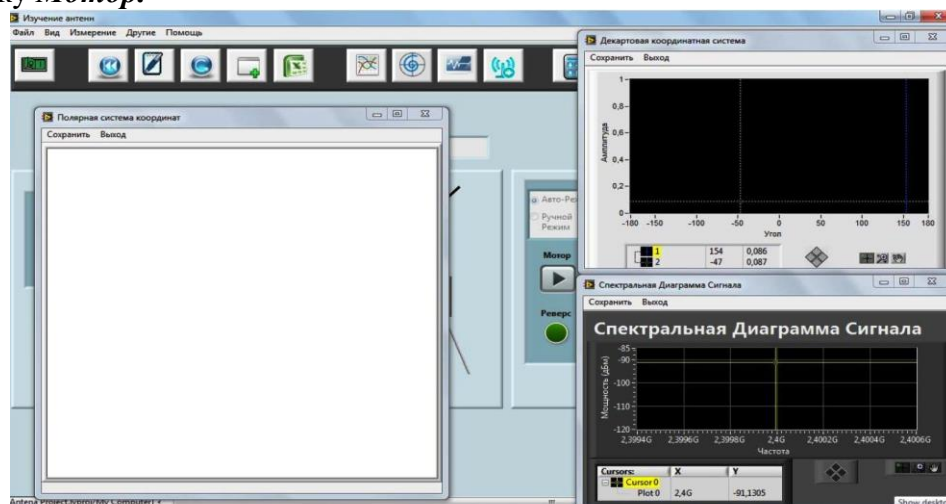
При достижении антенной конечного угла автоматически включается реверс, и антенна возвращается в начальное положение.



Запустить генератор и анализатор кнопкой Старт на лицевой панели. Генерируемый сигнал, через выход RF OUT генератора N1 PX1e-5673E, будет излучаться вспомогательной антенной, а испытываемая антенна будет принимать этот сигнал. Через вход RF IN анализатора N1 PX1e-5663E измеряется уровень мощности, и значение в децибелах отображается на лицевой панели в поле Уровень принятой мощности.



На панели управления открыть поля декартовой и полярной системы координат, нажав кнопки  , удобно разместить эти окна на экране так, чтобы не заслонять кнопку **Мотор**.



7. Проверить расположение двух антенн по пункту 3. Запустить движение опорно-поворотного устройства нажатием кнопки **Мотор** на лицевой панели. Антенна начинает вращаться от 0° до значения, определяемого параметром *Конечный угол* и, соответственно зафиксированному в окне на лицевой панели шагу измерения (Шаг измерения), измеряются уровень принятой мощности в децибелах, нормированные результаты измерения графически записываются параллельно в двух окнах систем координат и в отдельный шаблонный файл в формате MS Excel. Достигнув значения, определяемого параметром *Конечный угол*, ОПУ начинает реверсное вращение, в процессе которого снова измеряются значения мощности поля излучения. Кривые, полученные во время реверсного вращении, записываются в тех же графических окнах, что и при первом витке вращении испытуемой антенны (в декартовой системе координат - другим цветом).

8. Для обеспечения достоверности результатов измерения пункт 6 повторить еще раз. В начале каждого следующего измерения необходимо нажимать кнопку **Новый сеанс**  на панели управления.

9. Сохранить измеренные графики четырех нормированных ДН в регистрационной папке студента.

10. Экспериментальные результаты автоматически перенесутся в отдельный шаблонный файл в формате MS Excel, в виде двух таблиц, чередующих друг друга.

11. Открыть *Excel*, нажимая кнопку **шаблон Excel**  на панели управления.

С8

1. Штыревая антенна.

1 1

30.05.2013 17:23:22

Изучение вибраторных антенн. Штыревая антенна

N	Угол (град.)	Амплитуда (дБ)
0	0	-45,765
1	0	-45,692
2	2	-45,559
3	3	-45,559
4	3	-44,057
5	5	-46,825
6	5	-46,825
7	6	-47,858
8	7	-47,858
9	9	-48,765
10	9	-49,376
11	10	-49,936
12	11	-53,039
13	12	-64,844

Задание Студент

Готово

70%

Обязательно сохранить полученные табличные данные измерений в плоскости E.

Измерение ДН в плоскости Н

1. Подготовиться к измерениям ДН испытуемой штыревой антенны в плоскости Н.

Для этого необходимо повторить п.п.3 **Измерение ДН в плоскости E** с той разницей, что испытуемую и вспомогательную штыревые антенны надо повернуть на 90°, ориентируя их по вертикали.



Обязательно сохранить полученные табличные данные измерений в плоскости Н.

Обработка результатов измерений

1. Просчитать усредненные результаты четырёх измерений нормированных ДН в обеих плоскостях, зафиксированных в шаблонном файле формата *Excel*. Записать полученные значения в том же файле, заполнив Таблицу 5 и Таблицу 6. Советуем внимательно проследить при заполнении таблиц за значениями функций и аргумента (при реверсном повороте углы изменяются в убывающем порядке).

Таблица 5

θ	$f_{E1}(\theta)$	$f_{E2}(\theta)$	$f_{E3}(\theta)$	$f_{E4}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{E1}(\theta)$	$f_{E2}(\theta)$	$f_{E3}(\theta)$	$f_{E4}(\theta)$	σ
						$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	

Таблица 6

φ	$f_{H1}(\theta)$	$f_{H2}(\theta)$	$f_{H3}(\theta)$	$f_{H4}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{H1}(\theta)$ $f_{Hcp}(\theta)$	$f_{H2}(\theta)$ $f_{Hcp}(\theta)$	$f_{H3}(\theta)$ $f_{Hcp}(\theta)$	$f_{H4}(\theta)$ $f_{Hcp}(\theta)$	σ	σ

2. Определить погрешность результатов измерений в обеих плоскостях по формуле

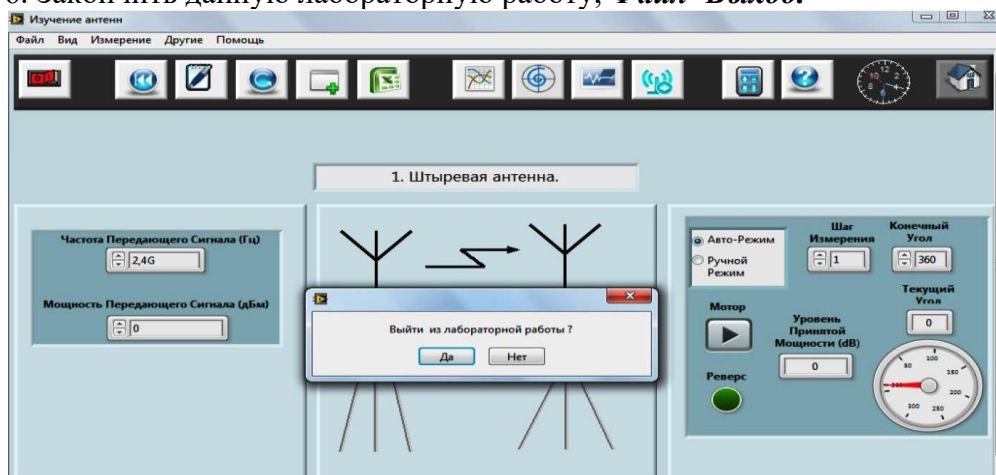
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{cp})^2}$$

3. Построить ДН антенны в обеих плоскостях по усредненным значениям функций (см. Таблица 5 и Таблица 6).

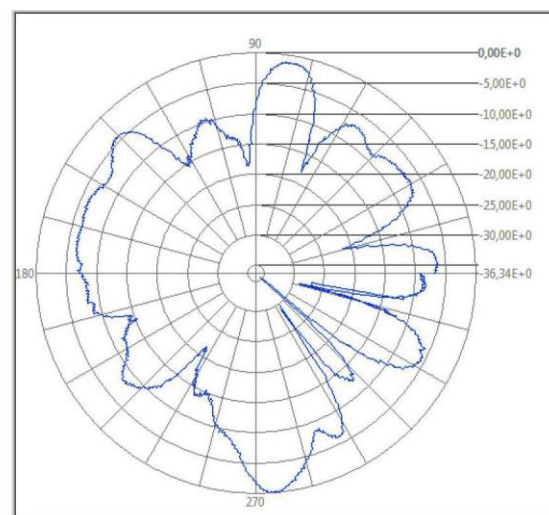
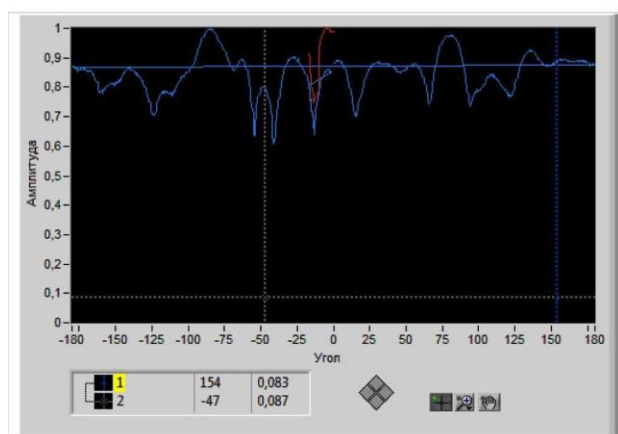
4. Сравнить усредненный результат измерений в плоскости E для расстояния $r = 1.5 \text{ м}$ с расчетными результатами, записанными в таблице 4.

5. Нажать кнопку **Стоп**.

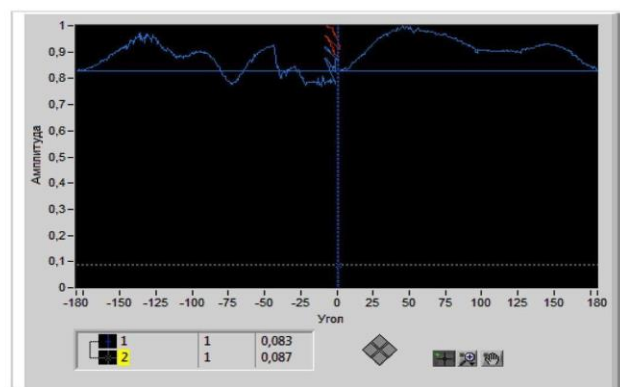
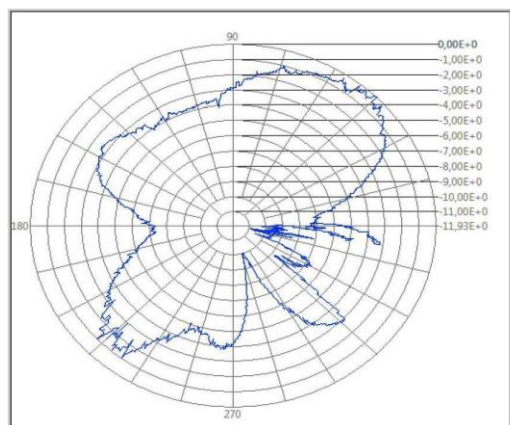
6. Закончить данную лабораторную работу, **Файл>Выход**.



После выполнения опыта: 1. ДН в горизонтальной плоскости будет иметь примерно следующий вид:



ДН в вертикальной плоскости будет иметь примерно следующий вид:



Оборудование и материалы

1. Учебный класс с лабораторным стендом по исследованию антенн.

Указания по технике безопасности

1. К проведению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.

2. Включение лабораторных установок (компьютеров) осуществляется только с разрешения преподавателя.

3. При проведении лабораторной работы не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.

4. Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов лабораторных установок (компьютеров).

5. При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.

6. В аудитории запрещается пользоваться источниками открытого огня. При возгорании оборудования его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.

7. Стенд необходимо эксплуатировать в помещении, не подверженном воздействию факторов, повышающих опасность поражения электрическим током (повышенная влажность, отсутствие шины заземления, и т. д.).

8. Запрещается включение установки в сеть в атмосфере, содержащей горючие газы или легковоспламеняющиеся жидкости.

9. Корпус лабораторной установки должен быть заземлен. Сопротивление контура заземления не должно превышать 4 Ом. Соблюдайте общие правила техники безопасности применимые к приборам, имеющим питание от сети переменного тока.

10. При возникновении непредвиденных лабораторной работой неисправностей, а также в случае появления запаха, свидетельствующего о возгорании электрических проводов или радиокомпонентов, следует незамедлительно прекратить работу с установкой, выключив ее из сети и обратиться к обслуживающему персоналу.

11. Для исключения возможности СВЧ облучения запрещается стоять в непосредственной близости от раскрытия передающей антенны.

12. Лабораторный стенд имеет низковольтное питание. Питание подается от модулей N1 PXI.

13. Запрещается подключать к рабочему стенду другие блоки питания или производить какие-либо внешние подключения.

14. По окончании работы с лабораторным оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задание по выполнению лабораторной работы:

1. Изучить теоретический материал по учебному вопросу 1.
2. Выполнить практическое задание по учебному вопросу 2.

3. Ответить на контрольные вопросы.
4. Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета:

1. Титульный лист (образец представлен в Приложении 1).
2. Цель занятия.
3. Основные теоретические положения, изучаемого материала. Выводы по ним, подчеркивающих суть, изучаемого вопроса.
4. Перечень практических заданий. По каждому заданию представляются расчеты, обоснования (результаты исследований) и выводы по ним.

Все результаты должны быть оформлены в виде таблиц и графиков. Отчет должен содержать:

1. Расчетные данные (Таблица 2 и Таблица 4) и графики ДН.
2. Результаты экспериментальных исследований и их обработку (Таблица 5 и Таблица 6) и графики ДН.

Примечание: Максимальное количество баллов студент получает, если оформление отчета соответствует установленным требованиям, а отчет полностью раскрывает суть лабораторной работы. Основанием для снижения оценки являются:

- наличие ошибок, не искажающих сути, рассматриваемого вопроса;
- небрежный отчет.

Отчет может быть отправлен на доработку в следующих случаях:

- неправильные расчеты (ошибки допущенные при проведении исследований);
- не обоснованные (ошибочные) выводы;
- не полностью выполненная работа.

Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип действия симметричного вибратора.
2. Что собой представляет резонансная частота вибраторной симметричной антенны?
3. Определить резонансную длину вибратора, если частота генератора $f_1 = 100 \text{ МГц}$; $f_2 = 200 \text{ МГц}$; $f_3 = 300 \text{ МГц}$.
4. Перечислить основные параметры вибраторных антенн.
5. Что такое диаграмма направленности антенны?
6. Что собой представляют ДН в прямоугольной и полярной системах координат?

Список рекомендованной литературы:

1. Велигоша А.В. Лабораторный практикум по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».
2. Велигоша А.В. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студента по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».

Практическая работа 6.

Моделирование и исследование антенных решеток.

Цель работы:

1. Ознакомление с теоретическими основами и изучение основных свойств интерферометров и антенных решеток. Выявление влияния законов распределения амплитуд и распределение фаз поля на основные параметры антенны.
2. Формирование умений по расчету и построению диаграмм направленности (ДН) антенных решеток с использованием специального программного обеспечения и выявлению условий возникновения побочных максимумов ДН.
3. Формирование навыка измерения ДН синфазных антенных решеток.

Учебные вопросы:

1. Многовибраторные синфазные решетки.
2. Измерение ДН в плоскости Е.
3. Измерение ДН в плоскости Н.

1. Многовибраторные синфазные решетки

В ряде случаев необходимо получить узкие диаграммы направленности, то есть, чтобы антенны концентрировали излучаемые ими электрические волны в узкие пучки.

Этого можно добиться при помощи нескольких вибраторов, возбуждаемых синфазно и равномерно.

Предположим, что имеется m рядов симметричных вибраторов. Расстояние между центрами соседних вибраторов равно d_1 , а расстояние между соседними рядами вибраторов – d_2 . Такая система называется плоской двумерной решеткой вибраторов. В общем случае, такая решетка может состоять из любых идентичных излучателей, одинаковым образом ориентированных в пространстве. В данной лабораторной работе решетка состоит из patch-вибраторов, которые работают на $\lambda = 12,5\text{см}$.

Когда антенна состоит из одного ряда линейных вибраторов, расположенных вдоль некоторой оси (Табл. 1), в произвольном направлении, образующим угол θ с нормалью к линии расположения вибраторов, напряженность поля в дальней зоне равна:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots \vec{E}_n \quad (1)$$

где $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots \vec{E}_n$ - векторы напряженности полей, создаваемых отдельными вибраторами.

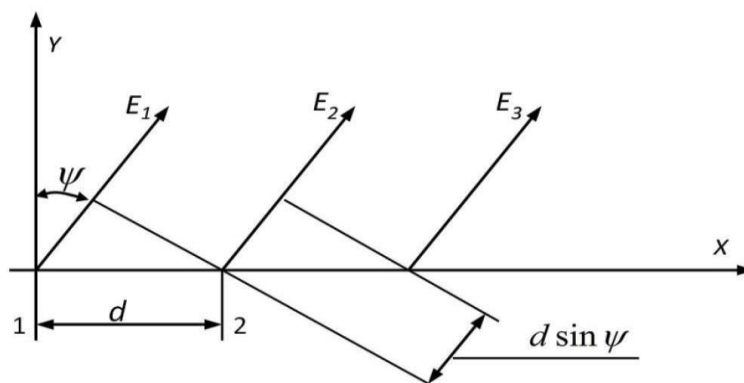


Рисунок 1. Векторы напряжённости полей, создаваемых линейными вибраторами

Если принять во внимание, что расстояние до точки, где имеется поле, во много раз превышает длину линейки вибратора, $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots \vec{E}_n$ практически одинаковы по величине, и отличаются только сдвигом фаз, вызванным разностью хода лучей из-за неодинаковости длины путей отдельных вибраторов до точки приема $d_{12} = d \sin \psi$, где d - расстояние между

серединами двух соседних вибраторов. Для суммарного электрического поля напряженность равна:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 \frac{\sin \left[\frac{nk d}{2} \sin \theta \right]}{\sin \left[\frac{k d}{2} \sin \theta \right]} e^{\frac{i(n-1)}{2} k d \sin \theta} \quad (2)$$

где n - число вибраторов.

Здесь, E_1 - напряженность поля первого вибратора, которая для симметричного вибратора может быть записана в виде

$$E_1 = i \frac{60 I_{\text{пуч}}}{r} \cdot \frac{\cos(kL \sin \theta) - \cos kL}{\cos \theta} \quad (3)$$

$$e^{\frac{i(n-1)}{2} k d \sin \theta} = e^{i\psi(\theta)} e^{-ikr} \quad (4)$$

где $\psi(\theta)$ - фазовая характеристика направленности; $I_{\text{пуч}}$ - ток пучности.

В общем виде (2) можно представить следующим образом:

$$E = A f_1(\theta) f_c(\theta) e^{i\psi(\theta)} e^{-ikr} \quad (5)$$

где $f_1(\theta)$ - характеристика направленности элемента решетки; $f_c(\theta)$ - множитель системы, то есть характеристика направленности линейной системы, состоящей из ненаправленных излучателей.

Зависимость фазы напряженности от угла θ объясняется выбором начала отсчета. Если начало отсчета фазы выбрать в геометрическом центре антенны, то фазовая характеристика $\psi(\theta)$ превращается в константу и множитель $e^{i\psi(\theta)}$ в формуле (4) может быть отброшен. Это означает, что рассматриваемая антенна излучает волну со сферическим фронтом волны, и фазовый центр антенны совпадает с геометрическим центром.

При большом числе вибраторов направленные свойства линейки определяются, в основном, множителем системы:

$$f_c(\theta) = \frac{\sin \left[\frac{nk d}{2} \sin \theta \right]}{\sin \left[\frac{k d}{2} \sin \theta \right]} \quad (6)$$

или же:

$$f_c(\theta) = \frac{\sin nx}{\sin x}, \quad (7)$$

где $x = \frac{k d}{2} \sin \theta$.

Максимальное значение $f_c(\theta)$ получается при $\theta = 0^\circ$ и равно n . Нормированная ДН определяется, как отношение $\frac{E}{E_{\text{max}}}$ и обозначается $F(\theta)$.

Для синфазной антенной решетки (САР) диаграмма направленности, определяемая по формуле (7) - многолепестковая (рисунок 2 Диаграмма направленности САР).

$$F(\theta) = \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos kl}{\sin \theta (1 - \cos kl)} \cdot \frac{\sin nx}{n \sin x}. \quad (8)$$

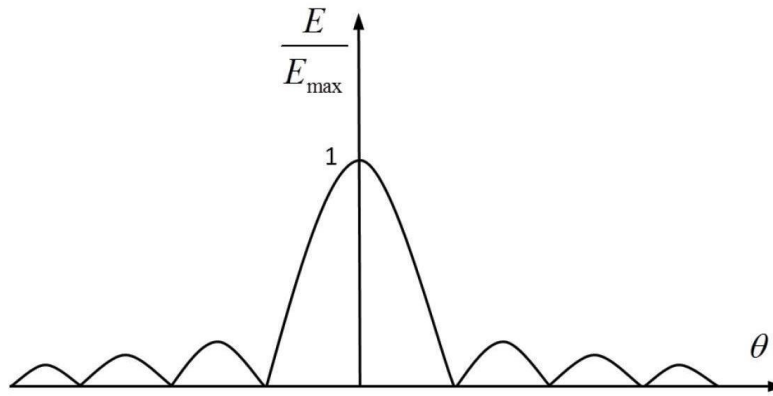


Рисунок 2. Диаграмма направленности САР

Напряженность излучаемого антенной поля максимальна в направлении $\theta = 0^\circ$. Поля от отдельных вибраторов в этом направлении складываются арифметически и являются синфазными.

Если антенна состоит из нескольких рядов линейных, синфазно возбужденных вибраторов (Табл. 3), расположенных в одной плоскости, множитель системы в этом случае выражается формулой:

$$f_c(\theta, \varphi) = \frac{\sin \left[\frac{n_1 k d_1}{2} \sin \theta \cos \varphi \right]}{\sin \left[\frac{k d_1}{2} \sin \theta \cos \varphi \right]} \cdot \frac{\sin \left[\frac{n_2 k d_2}{2} \sin \theta \cos \varphi \right]}{\sin \left[\frac{k d_2}{2} \sin \theta \cos \varphi \right]}. \quad (9)$$

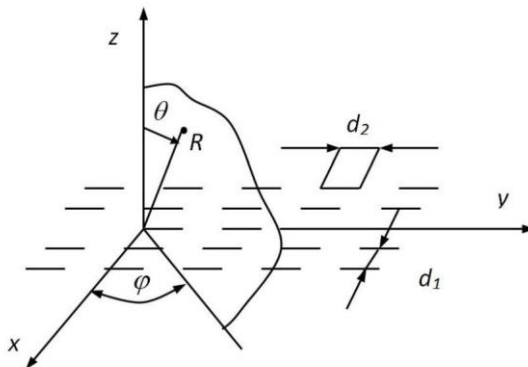


Рисунок 3. Линейная антенная решётка

Если токи ряда вибраторов не синфазны, а сдвиг фаз между соседними вибраторами постоянен и равен ψ , то для ряда вибраторов множитель системы определится формулой:

$$f_c(\theta) = \frac{\sin \left[\frac{n}{2} (k d \sin \theta - \psi) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (k d \sin \theta - \psi) \right]}. \quad (10)$$

Максимальное излучение получается под углом $\theta_{\max}$, определяемым из соотношений:

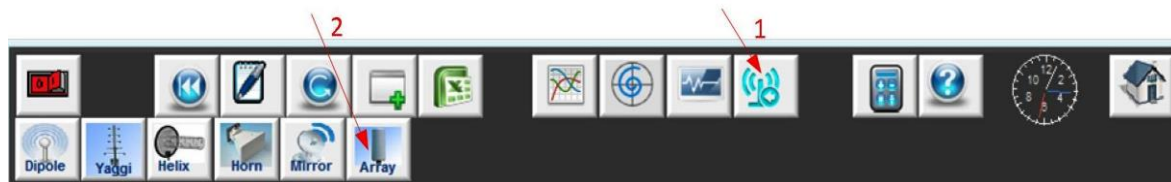
$$\sin \theta_{\max} = \frac{\psi}{k d} = \frac{\psi \lambda}{2 \pi d} \quad (11)$$

Видно, что путем изменения величины ψ можно менять направление максимального излучения.

Аналогично для антенны, состоящей из нескольких рядов, можно управлять направлением максимального излучения по углам θ_1 и φ_1 соответственно.

Расчетное задание

Рассчитать и построить в декартовой системе координат ДН синфазной антенной решетки из вибраторных антенн, из щелевых антенн, из директорных антенн, из рупорных, спиральных и зеркальных антенн по формулам (5 и 9); графически определить величины ширины главного лепестка диаграмм направленности. Для упрощения расчетов, в практикуме предлагается возможность компьютерного расчета. На панели управления щелкните по иконке (1), затем запустите симуляционную функцию **Array**, щелкнув по иконке (2).



Откроется лицевая панель симуляционной функции *Array*.

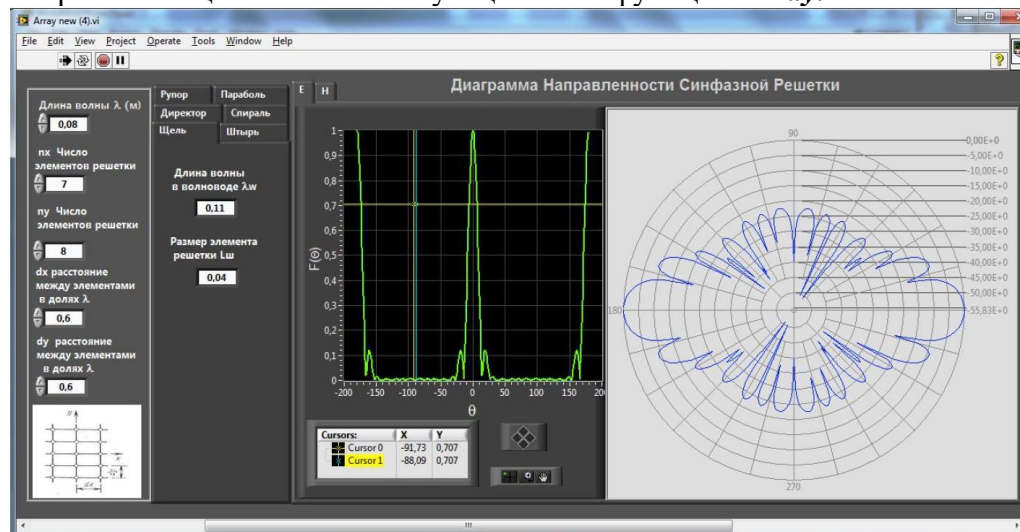


Рисунок 4. Лицевая панель программы

Данные для расчета берутся из Табл. 1 в соответствии с вариантом, номер которого соответствует порядковому номеру фамилии студента в журнале.

Таблица 1

Вариант				1	2	3	4	5	6	7	8	
Длина волны λ , м				λ	0.3	1	0.4	0.6	1.1	0.5	0.2	0.25
Число элементов вдоль оси X, n_1				n_1	10	5	7	20	3	40	70	65
Число элементов вдоль оси Y, n_2				n_2	10	2	10	30	2	30	70	80
Расстояние между элементами d_1 , см (* 10^{-1} м - в случае спиральных, рупорных и зеркальных излучателей)				d_1	40	58	45	60	60	30	15	20
Расстояние между элементами d_2 , см (* 10^{-1} м - в случае спиральных, рупорных и зеркальных излучателей)				d_2	50	60	45	50	80	40	20	20
9		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
λ	0.17	0.8	0.7	1.2	0.24	0.77	0.82	0.9	0.12	0.15	0.18	
n_1	50	12	20	4	70	5	6	6	100	45	10	

n_2	60	20	10	4	60	5	10	3	100	60	10
d_1	15	50	50	100	20	50	70	100	7	10	7
d_2	20	50	40	100	20	45	100	100	7	10	8

Остальные необходимые исходные данные расчетов для используемой в качестве элемента решетки вибраторной (щелевой), директорной, спиральной, рупорной и зеркальной антенн могут быть взяты из заданий по расчету соответствующей антенны в тексте лабораторных работ.

Данные вводить в лицевую панель программы, рисунок 4, поочередно открывая все шесть страниц на фронтальной панели симуляционной программы. После этого на графиках появятся нормированные ДН в плоскости E и H в декартовой и полярной системах координат для САР, составленные из всех шести типов излучателей.

Определить для каждой полученной нормированной ДН, ширину ее основного лепестка - угловой сектор $2\theta_0(2\varphi_0)$ и $2\theta_{0,5}(\varphi_{0,5})$. Определить также уровень первого бокового лепестка в относительных единицах и в децибелах. При необходимости, воспользоваться разъяснениями из раздела 9.2 «Определение углового сектора $2\theta_{0,5}(2\varphi_{0,5})$ и уровня первого бокового лепестка диаграммы направленности, стр. 26» технического описания лабораторного стенда. Результаты внести в таблицу 2.

Таблица 2

Тип излучателя САР	в плоскости E		в плоскости H		Кол-во основных лепестков ДН	Уровень первого бокового лепестка, отн.ед./дБ
	$2\theta_0$	$2\theta_{0,5}$	$2\varphi_0$	$2\varphi_{0,5}$		
Вибраторные излучатели						
Щелевые излучатели						
Директорные излучатели						
Спиральные антенны						
Рупорные антенны						
Зеркальные антенны						

Отдельно рассчитать ориентировочную ширину ДН САР (с вибраторными излучателями) по нулям и по половинной мощности в плоскости E по формулам:

$$2\theta_0 = 115 \frac{\lambda}{n_1 d_1}, \quad 2\theta_{0,5} = 51 \frac{\lambda}{n_1 d_1};$$

и в плоскости H по формулам:

$$2\varphi_0 = 115 \frac{\lambda}{n_2 d_2}, \quad 2\varphi_{0,5} = 51 \frac{\lambda}{n_2 d_2}.$$

Сравнить полученные результаты со значениями, полученными графически при компьютерном расчете для САР из вибраторных антенн.

Запомнить результаты всех расчетов и рисунки расчетных ДН. Выйти из симуляционной программы.

2. Измерение ДН в плоскости E

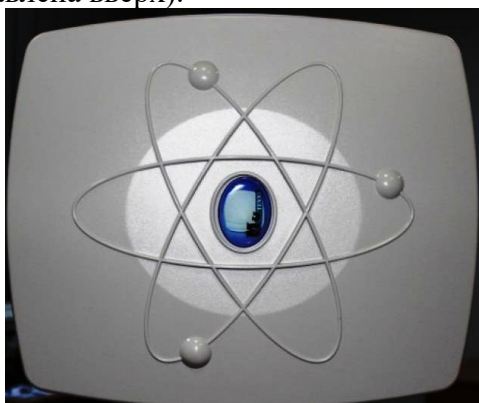
1. Установить штыревую антенну (10) (см. 4.1 *Оборудование стенда*, стр. 6) на треногу для вспомогательной антенны (см. 6.2 *Сборка стенда*, стр. 12).

2. Подсоединить ее к выходу RF OUT генератора N1 PX1e-5673E (см. 6.3 *Сборка контрольно-измерительного оборудования*, стр.13), использовать коаксиальный кабель (14) (см. 4.1 *Оборудование стенда*, стр. 6). Вспомогательная антенна должна быть в вертикальном положении.



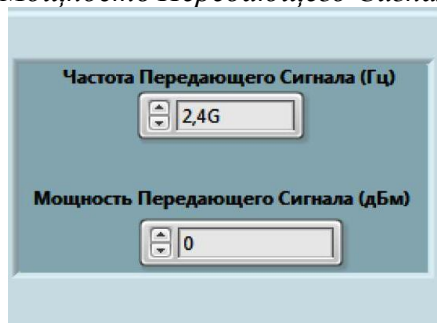
3. Установить САР (5) (см. 4.1 *Оборудование стенда*, стр. 6) на опорно-поворотное устройство для испытуемой антенны (см. 6.2 *Сборка стенда*, стр. 12).

4. Подсоединить ее к входу RF IN анализатора N1 PX1e-5663E. Использовать коаксиальный кабель (15), (см. 4.1 *Оборудование стенда*, стр. 6). Испытуемая антенна должна быть в вертикальном положении (стрелка V на оборотной стороне корпуса антенны направлена вверх).



5. Разнести испытуемую и вспомогательную антенны на расстояние $r = 1,5\text{м}$, причем ориентировать антенны так, чтобы они были направлены друг на друга соосно. Важно также, чтобы точки подключения к фидерам испытуемой и вспомогательной антенн находились на одинаковой высоте.

6. На лицевой панели в поле *Частота Передающего Сигнала* ввести $f = 2,4\text{ГГц}$, а в поле *Мощность Передающего Сигнала* - 0дБм.



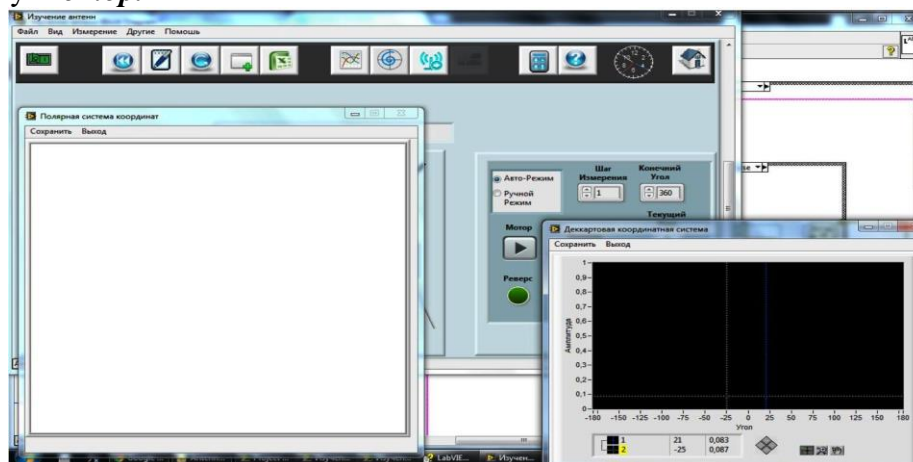
В поле *Шаг измерения* ввести необходимое значение (по умолчанию 1), соответствующее шагу измерения, в градусах, а в поле *Конечный Угол* ввести значение (по умолчанию 360) соответствующее конечному положению антенны. При достижении антенной конечного угла автоматически включается реверс, и антенна возвращается в начальное положение.



8. Запустить генератор и анализатор кнопкой Старт на лицевой панели. Генерируемый сигнал, через выход RF OUT генератора N1 PX1e-5673E, будет излучаться вспомогательной антенной, а испытуемая антенна будет принимать этот сигнал. Через вход RF IN анализатора N1 PX1e-5663E измеряется уровень мощности, и значение в децибелах отображается на лицевой панели в поле Уровень принятой мощности.



9. На панели управления открыть поля декартовой и полярной системы координат, нажав кнопки   удобно разместить эти окна на экране так, чтобы не заслонять кнопку **Мотор**.



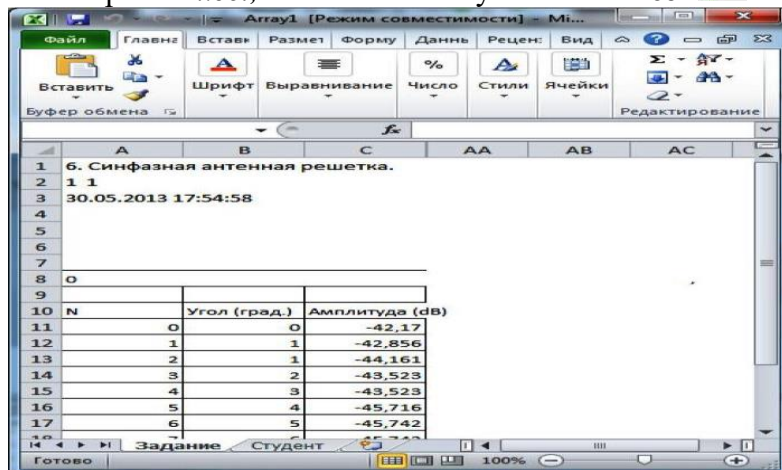
10. Проверить расположение двух антенн по пункту 5. Запустить движение опорно-поворотного устройства нажатием кнопки **Мотор** на лицевой панели. Антенна начнет вращаться от 0° до значения, определяемого параметром *Конечный угол* и соответственно зафиксированному в окне на лицевой панели шагу измерения (Шаг измерения), измеряются уровень принятой мощности в децибелах, нормированные результаты измерения графически записываются параллельно в двух окнах систем координат и в отдельный шаблонный файл в формате MS Excel. Достигнув значения, определяемого параметром *Конечный угол*, ОПУ начинает реверсное вращение, в процессе которого снова измеряются значения мощности поля излучения. Кривые, полученные во время реверсного вращение, записываются в тех же графических окнах, что и при первом витке вращения испытуемой антенны (в декартовой системе координат - другим цветом).

Для обеспечения достоверности результатов, измерения пункт 9 повторить еще раз. В начале каждого следующего измерения необходимо нажимать кнопку **Новый сеанс**  на панели управления.

11. Сохранить измеренные графики четырех нормированных ДН в регистрационной папке студента.

Экспериментальные результаты автоматически перенесутся в отдельный шаблонный файл в формате MS Excel, в виде двух таблиц, чередующих друг друга.

12. Открыть *Excel*, нажимая кнопку шаблон **Excel**  на панели управления.

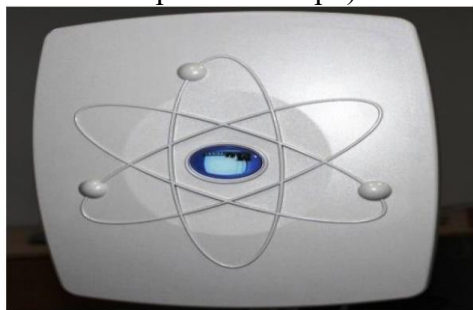


N	Угол (град.)	Амплитуда (dB)
0	0	-42,17
1	1	-42,856
2	2	-44,161
3	3	-43,523
4	4	-43,523
5	4	-45,716
6	5	-45,742

13. Обязательно сохраните полученные табличные данные измерений в плоскости *E*.

3. Измерение ДН в плоскости *H*

1. Подготовиться к измерениям ДН испытуемой САР в плоскости *H*, повернув испытуемую антенну на 90° по отношению к вертикали (стрелка *H* на оборотной стороне корпуса САР направлена вверх).



2. Повторить вышеуказанные п. п. 5-11.

3. Обязательно сохраните полученные табличные данные измерений в плоскости *H*.

Обработка результатов измерений

1. Просчитать усредненные результаты четырех измерений ДН в обеих плоскостях САР, зафиксированных в шаблонном файле формата *Excel*. Записать полученные значения в том же файле, заполнив таблицы Табл. 3 и Табл. 4. Рекомендуется внимательно проследить при заполнении таблиц за значениями функций и аргумента θ (при реверсном повороте углы изменяются в убывающем порядке).

Таблица 3

θ	$f_{E1}(\theta)$	$f_{E2}(\theta)$	$f_{E3}(\theta)$	$f_{E4}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{E1}(\theta)$	$f_{E2}(\theta)$	$f_{E3}(\theta)$	$f_{E4}(\theta)$	σ
						$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	

Таблица 4

φ	$f_{H1}(\theta)$	$f_{H2}(\theta)$	$f_{H3}(\theta)$	$f_{H4}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{H1}(\theta)$	$f_{H2}(\theta)$	$f_{H3}(\theta)$	$f_{H4}(\theta)$	σ
						$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	

2. Определить погрешность результатов измерений в обеих плоскостях по формуле

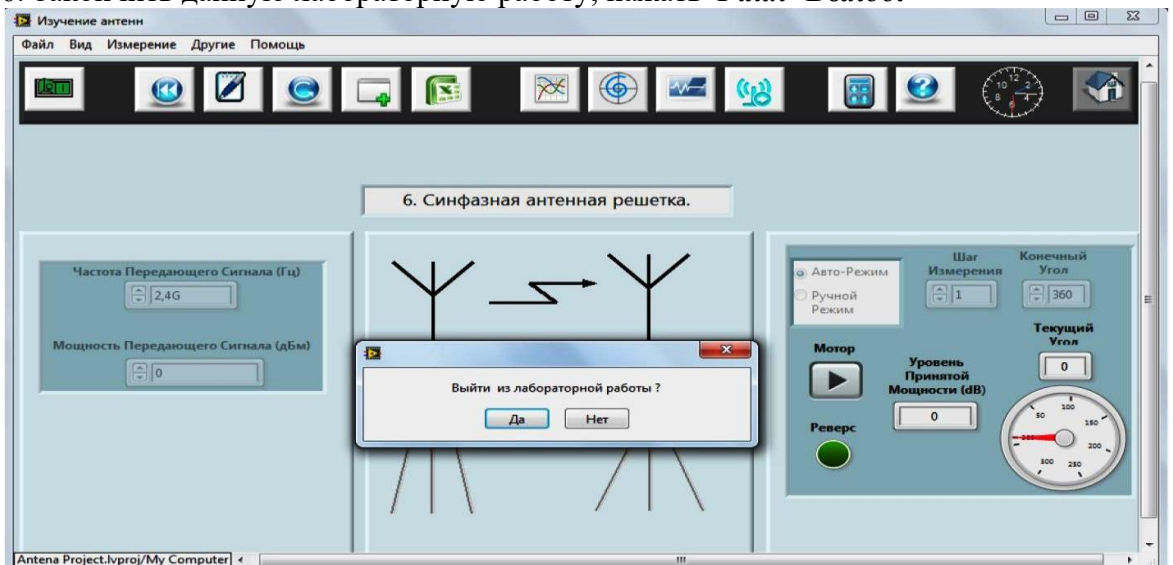
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{cp})^2}. \text{ Оценить точность измерений.}$$

3. Построить ДН САР в обеих плоскостях по усредненным значениям функций (см. Табл. 3 и Табл. 4).

4. Сравнить усредненные результаты измерений в плоскостях E и H (ширины ДН) с техническими данными, указанными фирмой-изготовителем в паспорте испытуемой антенны.

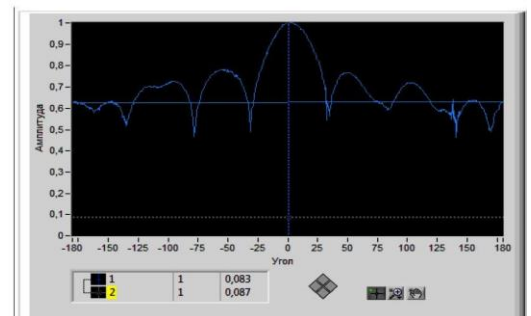
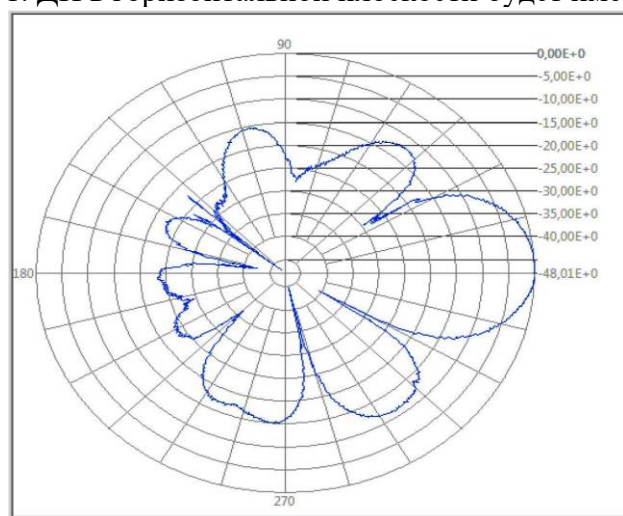
5. Нажать кнопку **Стоп**.

6. Закончить данную лабораторную работу, нажать **Файл>Выход**.

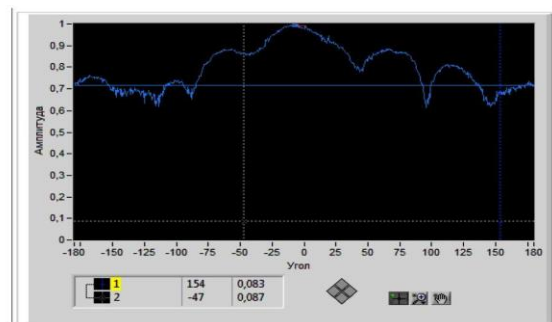
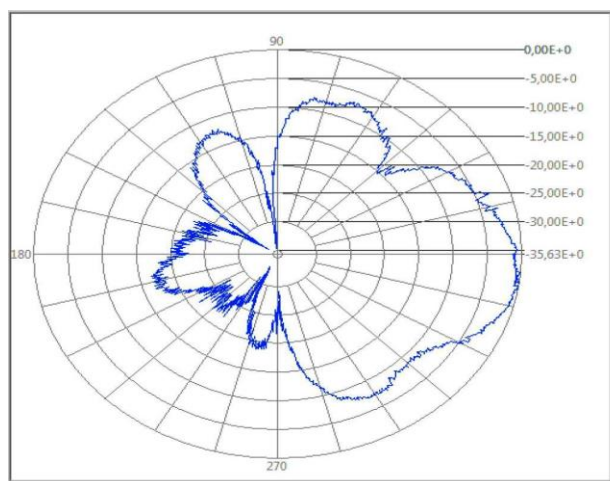


7. Выйти из главного меню программы. После выполнения опыта:

1. ДН в горизонтальной плоскости будет иметь примерно следующий вид:



2. ДН в вертикальной плоскости будет иметь примерно следующий вид:



Оборудование и материалы

1. Учебный класс с лабораторным стендом по исследованию антенн.

Указания по технике безопасности

1. К проведению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.

2. Включение лабораторных установок (компьютеров) осуществляется только с разрешения преподавателя.

3. При проведении лабораторной работы не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.

4. Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов лабораторных установок (компьютеров).

5. При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.

6. В аудитории запрещается пользоваться источниками открытого огня. При возгорании оборудования его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.

7. Стенд необходимо эксплуатировать в помещении, не подверженном воздействию факторов, повышающих опасность поражения электрическим током (повышенная влажность, отсутствие шины заземления, и т. д.).

8. Запрещается включение установки в сеть в атмосфере, содержащей горючие газы или легковоспламеняющиеся жидкости.

9. Корпус лабораторной установки должен быть заземлен. Сопротивление контура заземления не должно превышать 4 Ом. Соблюдайте общие правила техники безопасности применимые к приборам, имеющим питание от сети переменного тока.

10. При возникновении непредвиденных лабораторной работой неисправностей, а также в случае появления запаха, свидетельствующего о возгорании электрических проводов или радиокомпонентов, следует незамедлительно прекратить работу с установкой, выключив ее из сети и обратиться к обслуживающему персоналу.

11. Для исключения возможности СВЧ облучения запрещается стоять в непосредственной близости от раскрыва передающей антенны.

12. Лабораторный стенд имеет низковольтное питание. Питание подается от модулей N1 PXI.

13. Запрещается подключать к рабочему стенду другие блоки питания или производить какие-либо внешние подключения.

14. По окончании работы с лабораторным оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задание по выполнению лабораторной работы:

1. Изучить теоретический материал по учебному вопросу 1.
2. Выполнить расчетное задание учебного вопроса 1.
3. Провести измерение ДН в плоскости Е.
4. Провести измерение ДН в плоскости Н.
5. Ответить на контрольные вопросы.
6. Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета по лабораторной работе:

1. Титульный лист (образец представлен в Приложении 1).
2. Цель занятия.
3. Основные теоретические положения, изучаемого материала. Выводы по ним, подчеркивающих суть, изучаемого вопроса.

4. Перечень практических заданий. По каждому заданию представляются расчеты, обоснования (результаты исследований) и выводы по ним.

Отчет должен содержать:

Расчетные данные (Табл. 2).

Результаты экспериментальных исследований и их обработку (Табл. 3 и Табл. 4) и графики ДН.

Все результаты должны быть оформлены в виде таблиц и графиков.

Примечание: Максимальное количество баллов студент получает, если оформление отчета соответствует установленным требованиям, а отчет полностью раскрывает суть лабораторной работы. Основанием для снижения оценки являются:

- наличие ошибок, не искажающих сути, рассматриваемого вопроса;
- небрежный отчет.

Отчет может быть отправлен на доработку в следующих случаях:

- неправильные расчеты (ошибки допущенные при проведении исследований);
- не обоснованные (ошибочные) выводы;
- не полностью выполненная работа.

Контрольные вопросы

1. Что такое антенная решетка?
2. Что такое множитель решетки?
3. Принцип работы САР.
4. Какие параметры АР влияют на положение главного луча ДН?
5. Какие параметры САР влияют на ширину главного луча ДН?

Список рекомендованной литературы:

1. Велигоша А.В. Лабораторный практикум по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».
2. Велигоша А.В. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студента по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».
3. Техническое описание лабораторного стенда по исследованию антенн.

Практическая работа 5.

Моделирование и исследование антенны волновой канал.

Цель лабораторной работы:

1. Ознакомление с теоретическими основами и принципом работы антенны волновой канал.
2. Формирование умений по расчету и построению диаграмм направленности (ДН) и определению основных параметров направленного действия директорных антенн с использованием специального программного обеспечения.
3. Формирование навыка измерения ДН директорных антенн в результате пошагового изменения числа вибраторов, их размера и условий согласования с фидером, изменения расстояния между вибраторами.

Учебные вопросы:

1. Устройство и принцип работы директорной антенны.
2. Измерение ДН в плоскости Е.
3. Измерение ДН в плоскости Н.

1. Устройство и принцип работы директорной антенны

Антеннами бегущей волны (АБВ) называют системы, в которых распределение возбуждающего поля или тока описывается законом бегущей волны. Такие излучающие системы позволяют реализовать режим осевого излучения. При этом, фазовая скорость возбуждающего поля или тока несколько меньше скорости света (коэффициент замедления)

$$\xi = \frac{c}{V_\phi} = \frac{\psi}{kd} > 1,$$

где c - скорость света; V_ϕ - фазовая скорость; ψ - коэффициент направленного действия; k - волновое число; d - расстояние между серединами двух соседних вибраторов.

Поэтому, нередко АБВ выполняются на базе замедляющих структур, в которых распространяется поверхностная волна.

Поверхностные волны характеризуются экспоненциальным убыванием поля в радиальном направлении, связанной с этим концентрацией электромагнитной энергии вблизи оси направляющей системы (рисунок 1).

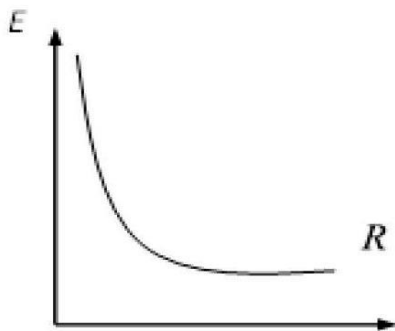


Рисунок 1. Экспоненциальное убывание поля в радиальном направлении

Коэффициент направленного действия у антенн бегущей волны осевого излучения зависит от сдвига фаз между полями, создаваемыми крайними элементами антенны в точке,

лежащей на продолжении оси антенны
$$\left[\psi_n = kL \left(\frac{c}{V_\phi} - 1 \right) \right].$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число; L - длина антенны.

Анализ показывает, что при $\frac{c}{V_\phi} > 1$ КНД АБВ максимален $\psi_n \approx 180^\circ$, то есть

$$\psi_{n\text{ опт}} = kL \left(\frac{c}{V_\phi} - 1 \right) \approx \pi \quad (1).$$

Из (1) можно определить оптимальную величину $\left(\frac{c}{V_\phi} \right)_{\text{опт}}$ при заданной длине L или $\left(\frac{L}{\lambda} \right)_{\text{опт}}$ при заданной фазовой скорости (V_ϕ) . Очевидно, что

$$\left(\frac{c}{V} \right)_{\text{опт}} = 1 + \frac{\lambda}{2L}; \left(\frac{L}{\lambda} \right)_{\text{опт}} = \frac{1}{2(\xi - 1)}. \quad (2)$$

Достижимая величина КНД в осевом направлении находится в пределах

$$D = (4 \dots 7, 2) \frac{L}{\lambda} \quad (3)$$

При этом ширина ДН по половинной мощности равна:

$$2\theta_{0,5} = (107 \dots 61)^\circ \sqrt{\frac{\lambda}{L}} \quad (4)$$

Уровень боковых лепестков по полю составляет 0,2...0,35 от главного максимума.

В формулах (3) и (4) левые цифры относятся к возбуждению с фазовой скоростью света в окружающей среде, а правые цифры - к возбуждению с оптимально замедленной фазовой скоростью.

Возбуждение АБВ, обычно, осуществляется с одного конца, а необходимый режим поддержания бегущей волны обеспечивается надлежащим выбором замедляющей системы и очень редко - применением специальных согласующих нагрузок на противоположном конце. В АБВ возбуждение само распространяется вдоль излучающей системы, от одного конца к другому, и поэтому их часто называют антеннами последовательного питания.

АБВ являются узкополосными, так как с изменением рабочей частоты может произойти резкое изменение V_ϕ в замедляющей системе, кроме того, могут меняться эффективность действия и качество согласования возбудителя. АБВ имеют малые размеры поперечного сечения излучающей системы. Это дает возможность строить не выступающие антенны бегущей волны на гладкой поверхности корпусов летательных объектов, а также, создавать очень легкие конструкции полноповоротных антенн.

К АБВ относятся: директорные, диэлектрические, спиральные антенны и другие различные структуры.

Директорные антенны, иногда называемые антеннами типа волновой канал, имеют простую конструкцию. Антенна представляет собой ряд параллельно расположенных вибраторов, длина каждого из которых приблизительно равна половине длины волны. Вибраторы находятся на расстоянии приблизительно $\lambda/4$ друг от друга. Один из вибраторов подключен к источнику питания и называется активным. Остальные вибраторы возбуждаются электромагнитным полем активного вибратора и называются пассивными.

При правильной настройке антенны максимум излучения направлен вдоль оси.

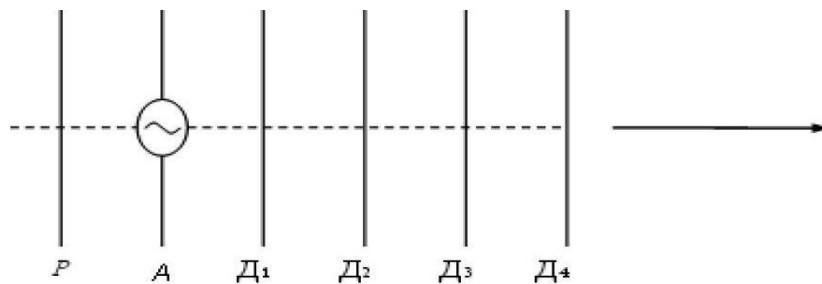


Рисунок 2. Директорная антенна

На рисунке 2 представлена директорная антенна, состоящая из питающего активного вибратора (А), пассивного рефлектора (Р) и ряда пассивных директоров (Д1, Д2, Д3, Д4). Все пассивные директоры настроены так, чтобы максимум излучения антенны был направлен вдоль оси антенны - в сторону директоров. Излучение в обратном направлении получается минимальным в случае наличия одного рефлектора, и нет необходимости использовать несколько рефлекторов, поскольку их возбуждение будет слабым и не внесет изменений в диаграмму направленности антенны.

Как известно из теории, ток в рефлекторе должен опережать по фазе ток в активном вибраторе, в зависимости от угла и расстояния между вибраторами. По этой причине ток директора должен отставать на соответствующий угол от относительного тока питающего вибратора по фазе; ток директора Д2 должен отставать от тока директора Д1 по фазе и так далее. В этом случае, излучения всех вибраторов прибавляются в направлении оси антенны (рисунок 2).

Как можно понять из вышеуказанного, для системы, которая состоит из двух вибраторов (активного и пассивного), необходимо фазовое смещение тока в рефлекторе благодаря индуктивным свойствам его сопротивления, что становится возможным из-за соответствующего удлинения рефлектора. По той же причине сопротивление пассивных директоров должно иметь емкостной характер, для чего длина директоров меньше, чем резонансная. Для правильной настройки необходимо знать зависимость изменения длины от диаметра вибратора. Чем толще вибратор, тем меньше его волновое сопротивление и тем больше потребуется менять длину вибратора для нужной настройки. Определение параметров многовибраторной директорной антенны теоретическим путем - очень сложная задача. Так, для вычисления тока в вибраторах антенны нужно решить систему, состоящую из N уравнений, где N - число вибраторов. Кроме того, длина вибратора, необходимая для правильной настройки, значительно отличается от половины длины волны. Поэтому, вычисление взаимного сопротивления таких вибраторов тоже сложная задача. По этой причине вычисление и обработка параметров многовибраторных директорных антенн, в основном, производится экспериментальным способом.

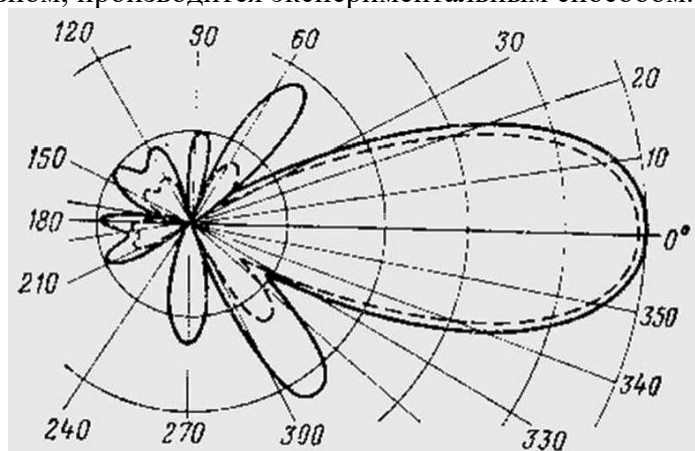


Рисунок 3. Экспериментальная диаграмма направленности антенны, состоящей из питающего вибратора, рефлектора и 6 директоров в вертикальной плоскости /- / и плоскости, в которой лежат вибраторы /- - - /

Диаграмма направленности, представленная на рисунке 3, получена экспериментальным путем. Расстояние от активного вибратора до рефлектора равно $0,17\lambda$, расстояние от вибратора до первого директора и между директорами равно $0,25\lambda$.

Боковые лепестки этой ДН достаточно велики. Уровень боковых лепестков можно несколько снизить в результате настройки, за счет расширения главного лепестка.

На рисунке 4 (а) приведена зависимость ширины главного луча ДН от относительной длины антенны L/λ . Сплошная линия соответствует плоскости, перпендикулярной оси вибраторов, а пунктирная - той плоскости, в которой находятся вибраторы.

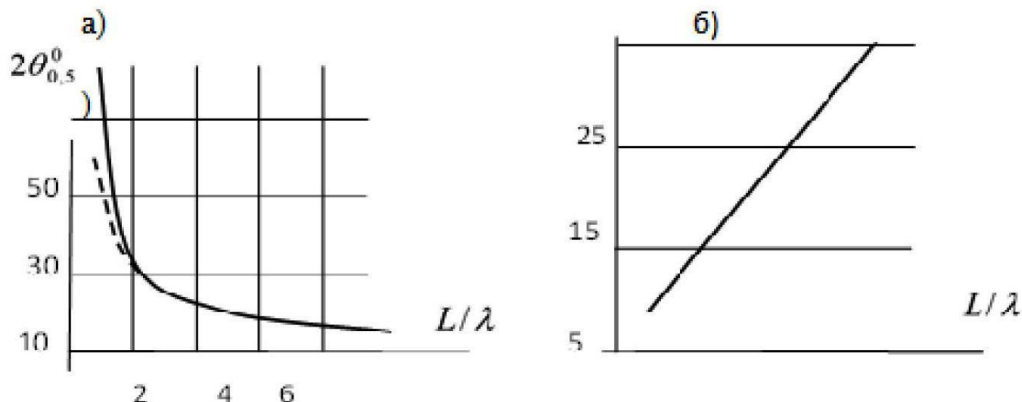


Рисунок 4. а) Зависимость ширины главного луча ДН директорной антенны от ее относительной длины; б) графическое определение КНД

Как видно из рисунка, с увеличением длины антенны ширина луча ДН уменьшается очень медленно. Объясняется это тем, что чем длиннее антенна, тем сложнее настроить ее директоры, амплитуда тока на вибраторах настолько мала, особенно на пассивных, которые больше отдалены от активного вибратора. Одна и та же длина антенны может быть получена при различном числе вибраторов. С точки зрения упрощения конструкции целесообразно иметь небольшое число вибраторов. Исходя из опыта известно, что если общая длина антенны близка к длине волны или чуть больше ее, то в этом случае можно увеличивать расстояние между директорами, доводя его до максимального, приблизительно $0,34\lambda$.

На рисунке 4, б показан график, по которому можно приближенно определить КНД антенны при заданной длине L/λ . Этот график можно аппроксимировать следующим выражением:

$$D \approx 7 + 4L/\lambda$$

Кривые на рисунке 4 построены на основе теоретических расчетов и данных экспериментов.

Под воздействием пассивных вибраторов уменьшается входное сопротивление директорной антенны. Как показано, один пассивный вибратор уменьшает сопротивление питающего вибратора до величины 50 Ом. Использование нескольких директоров уменьшает входное сопротивление до 20-30 Ом, из-за чего усложняются вопросы согласования с фидером. По этой причине в качестве питающего вибратора часто используют шлейф Пистолькорса - вибратор, входное сопротивление которого приблизительно в 4 раза больше, по сравнению с сопротивлением обыкновенного вибратора.

Приведем некоторые данные о длине вибратора. Укорачивая активный вибратор, достигаем резонанса. Его длина меньше $0,5\lambda$ на несколько процентов. Длина рефлектора приблизительно равна $0,5\lambda$ или на несколько процентов больше. Длина каждого директора находится в пределах $(0,4-0,48)\lambda$. Определено, что при увеличении числа директоров,

уменьшается их оптимальная длина. Указанные выше размеры зависят от выбора расстояния между вибраторами и уточняются в результате экспериментов.

Для настройки директорной антенны напротив нее, на расстоянии не меньше нескольких длин волн, устанавливают индикатор напряженности поля. При выборе расстояния между вибраторами антенны длина каждого вибратора настраивается по максимуму напряжения поля вдоль оси антенны. При выборе оптимальной длины каждого следующего вибратора может быть нарушена предыдущая настройка остальных вибраторов, общую настройку надо проводить методом последовательной аппроксимации. По завершении настройки, в целях проверки, необходимо измерить ДН.

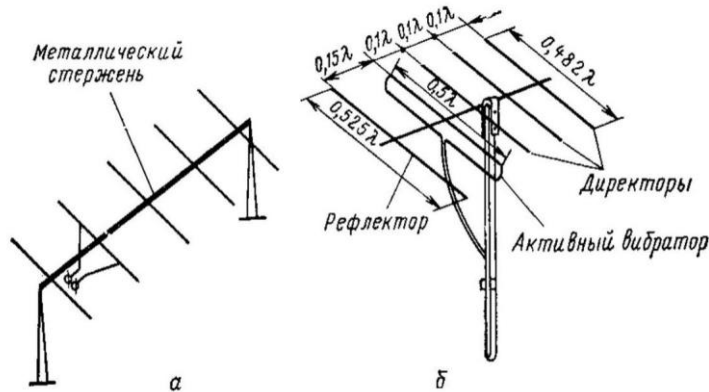


Рисунок 5. а) Директорная антенна, возбужденная вибратором параллельного питания, б) короткая директорная антенна, закрепленная на траверсе, возбужденная шлейф-вибратором

На рисунке 5 показаны варианты конструктивных решений директорных антенн. Все пассивные вибраторы закрепляются на одном общем металлическом стержне вдоль оси антенны. Это допустимо, поскольку в центральной части вибраторов имеется узел зарядов (нулевой потенциал). Питающий элемент в виде шлейф-вибратора Пистолькорса (б) или вибратора с параллельным питанием (а) также крепится на стержень. Такое крепление упрощает конструкцию антенны. Исключение составляет тот случай, когда в качестве питающего элемента используют обыкновенный полуволновый вибратор, который закрепляют на стержне при помощи изолятора.

Основное преимущество директорной антенны состоит в том, что ее конструкция сравнительно проста. Одним из недостатков директорной антенны является ее узкополосность и необходимость четкой настройки (она сохраняет параметры лишь в узкой полосе частот, измеряемой единицами процентов девиации). Директорная антенна непригодна для формирования узких ДН, чьи главные лучи уже $15-20^\circ$. Для получения диаграмм с малым $2\theta_{0,5}$ в некоторых случаях используют синфазные антенные решетки из ряда идентичных директорных антенн.

Питание директорной антенны осуществляется путем присоединения коаксиального кабеля к активному вибратору. Присоединение коаксиального кабеля к входу антенны осуществляется при помощи специальных симметрирующих устройств. Они бывают разных типов: U - колено, симметрирующий цилиндр или стакан, схема с компенсацией тока на наружной оболочке кабеля, схема щелевого возбуждения и другие. Рассмотрим работу U - колена, которое используется в большинстве случаев.

U - колено представляет собой отрезок коаксиального кабеля, имеющего форму буквы U (рисунок 6). Коаксиальный кабель, идущий от генератора (основной кабель), присоединяется в точке C к отрезку U - колена. Расстояние bc отличается от расстояния cda на $\frac{\lambda}{2}$ (λ - длина волны в кабеле). В частности, точка C может совпадать с точкой b . В этом

случае длина U - колена равна $\frac{\lambda}{2}$. Так как в длинной линии значение фазы тока или напряжения меняется на обратное через каждую половину длины волны, токи в точках a и b оказываются в противофазе. Между этими точками действует разность потенциалов $U_{ab} = U_a - U_b$, где $U_b = -U_a$ и плечи вибратора возбуждаются токами, одинаковыми по амплитуде и по фазе. Для предотвращения ответвления токов, текущих по внутренней поверхности экрана, внешние оболочки вблизи концов U - колена соединяются накоротко.

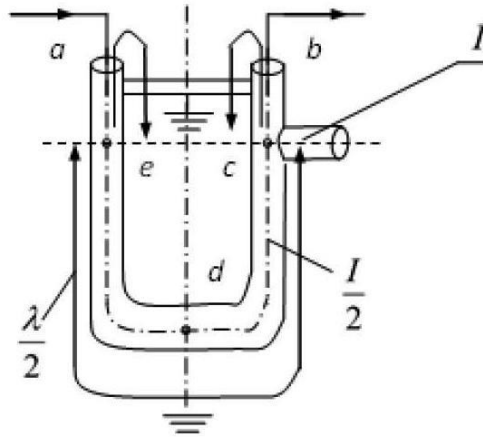


Рисунок 6. Работа U- колена

В случае полуволнового симметричного вибратора ($R_{ex} = 70$ Ом), для получения в основном кабеле режима бегущей волны, точку присоединения этого кабеля C надо расположить на расстоянии $\frac{\lambda}{4}$, от одного из концов U - колена. Это объясняется следующим: линия длиной $\frac{\lambda}{4}$ изменяет сопротивление нагрузки в соответствии с формулой

$$Z_{\text{вх}} = \frac{W^2}{Z_H},$$

где W^2 - волновое сопротивление; Z_H - сопротивление нагрузки.

Так как в данном случае $Z_H = R_{a-0} = R_{b-0} = 35$ Ом, W выбирается равным 70 Ом,

$$R_e = R_c = \frac{70^2}{35} = 140 \text{ Ом.}$$

Учитывая, что сопротивления в точке C складываются параллельно, основной кабель оказывается нагруженным на сопротивление, равное приблизительно 70 Ом.

Расчетное задание

Рассчитать вручную и построить в декартовой системе координат нормированную ДН директорной антенны по формуле, если коэффициент замедления $\xi = 1, 2$:

$$F(\theta) = \frac{\sin \left[\frac{kL}{2} (\xi - \cos \theta) \right]}{\frac{kL}{2} (\xi - \cos \theta)}.$$

Данные для расчета берутся из таблицы 1 в соответствии с вариантом, номер которого соответствует порядковому номеру фамилии студента в журнале.

Таблица 1

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8
Длина волны λ , м	λ	0,3	1	1,3	1,9	2,1	2,7	5,1	2
Число директоров	n	5	3	2	4	2	1	1	3

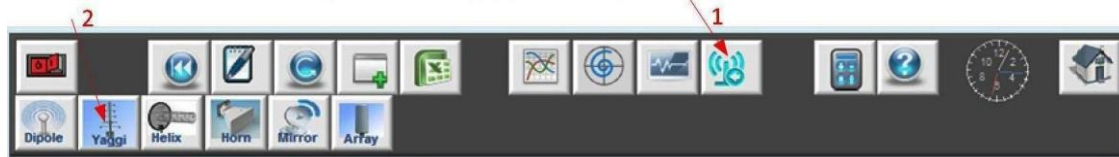
9		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
λ	3,5	1,4	0,7	1,5	0,2	1,7	0,5	0,9	0,65	2,9	1,6
n	3	7	8	4	7	2	6	5	4	2	2

ДН рассчитывается следующим образом. Определяется угол $2\theta_{0,5}$ (или $2\theta_0$) по формуле (4). Затем рассчитываются точки ДН, начиная с $\theta = 0^\circ$, с шагом $\frac{2\theta_{0,5}}{4}$ до конца первого бокового лепестка. Строится график $f(\theta)$, определяются значения $2\theta_0$, $2\theta_{0,5}$, (уточненные по построенному графику) и уровень первого бокового лепестка в децибелах. Определить оптимальную длину директорной антенны при известном коэффициенте замедления $\xi = 1,2$ по формуле (2). Занести полученные результаты в таблицу 2.

Таблица 2

вариант номер	λ	n	$2\theta_{0,5}$, градус	$2\theta_0$, градус	уровень первого бокового лепестка, отн.ед./дБ	$\left(\frac{L}{\lambda}\right)_{opt}$

Для упрощения расчетов, в лабораторном практикуме предлагается возможность компьютерного расчета. На панели управления щелкните по иконке (1), после чего запустите симуляционную функцию **Yaggi**, щелкнув по иконке (2).



Откроется лицевая панель симуляционной функции **Yaggi**.

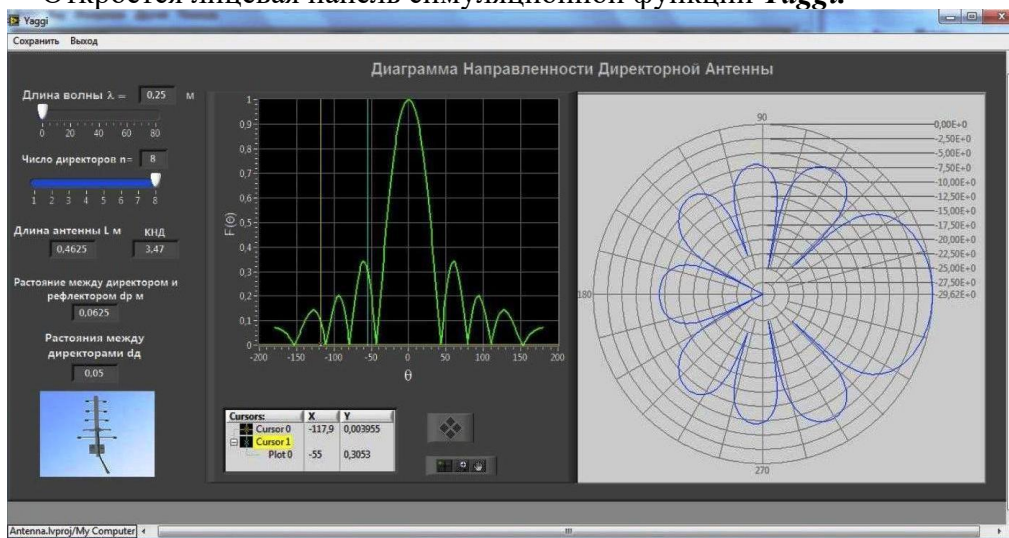


Рисунок 7. Лицевая панель программы

Данные для расчета берутся из таблицы 1 в соответствии с вариантом.

Данные вводить в лицевую панель программы, рисунок 7. После этого на графиках появятся нормированные ДН в плоскости Е в декартовой и полярной системах координат.

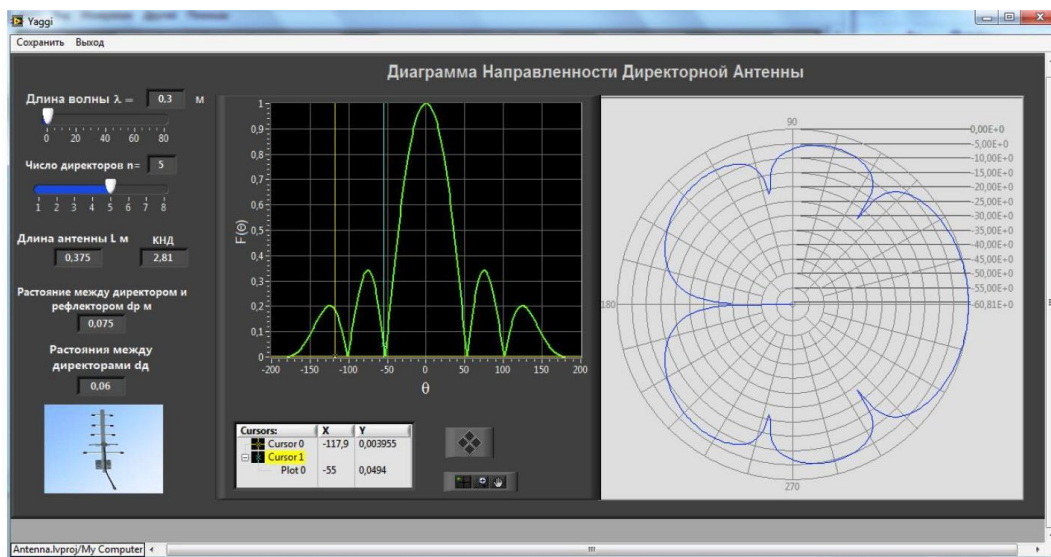


Рисунок 8. Нормированные ДН

Для полученной нормированной ДН определить ширину основного лепестка - угловой сектор $2\theta_{0,5}$. Определить также уровень первого бокового лепестка в относительных единицах и в децибелах. При необходимости, воспользоваться разъяснениями, приведенными в лабораторной работе 1 (стр. 22) или разделе 9.2 технического описания лабораторной установки «Определение углового сектора $2\theta_{0,5}$ ($2\varphi_{0,5}$) и уровня первого бокового лепестка диаграммы направленности». Результаты внести в таблицу 3.

Таблица 3

Вариант номер	λ	n	$2\theta_{0,5}$, градус	Уровень первого бокового лепестка, отн.ед./

Занести в таблицу 4 результаты расчета нормированной ДН директорной антенны ($\lambda = 60\text{см}$, $n = 3$), которая используется в данном лабораторном практикуме в качестве испытуемой.

Таблица 4

Испытуемая антенна	λ	n	$2\theta_{0,5}$ градус	Уровень первого бокового лепестка, отн.ед./дБ
	60 см	3		

Запомнить результаты всех расчетов и рисунок ДН для варианта с данными, указанными в таблице 4. Выйти из симуляционной программы.

2. Измерение ДН в плоскости Е

1. Установить вибраторную антенну телескопической конструкции (12) (см. 4.1 Оборудование стенда, стр. 6), которая представляет собой два металлических стержня, ввинченные в соответствующую диэлектрическую втулку, обеспечивающую подключение питания вибратора на треногу для вспомогательной антенны (см. раздел 6.2 Сборка стенда, стр. 12). Размер плеч вибратора чуть больше минимально возможного, длина вибратора от края до края равна 31 см.

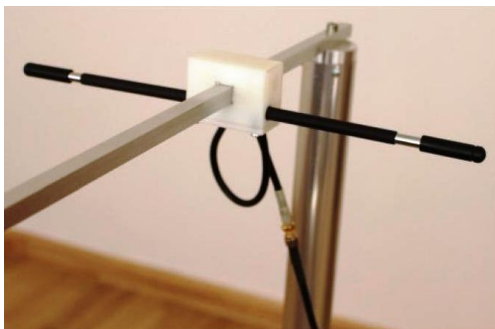
Примечание. При выдвигании телескопических плеч вибратора следует, по возможности, обеспечить одинаковую толщину стержня вдоль его длины.



2. Подсоединить ее к выходу RF OUT генератора N1 PX1e-5673E (см. раздел 6.3 Сборка контрольно-измерительного оборудования, стр.13). Использовать коаксиальный кабель (14) (см. 4.1. Оборудование стенда, стр. 6). К вибратору подключено U-колесо, подлине соответствующее рабочей частоте вибратора ($f = 500\text{МГц}$, $\lambda/2 = 30\text{см}$). Вспомогательная антенна должна быть в вертикальном положении.

3. Установить траверсу (7-3) (несущую штангу) директорной антенны (см. 4.1 Оборудование стенда, стр. 6) на опорно-поворотное устройство для испытуемой антенны.

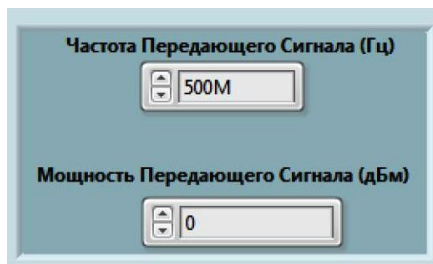
4. Закрепить на траверсе активный вибратор с согласующим устройством (7-2) телескопической конструкции (см. 4.1 Оборудование стенда, стр. 6). Вибратор закрепить вблизи стойки опорно-поворотного устройства со стороны, смотрящей на вспомогательную антенну. Испытуемая антенна должна быть в горизонтальном положении. Размер плеч вибратора - чуть больше минимально возможного - длина вибратора от края до края равна 31 см.



5. Подсоединить активный вибратор к анализатору напрямую. Использовать коаксиальный кабель (15) (см. 4.1 Оборудование стенда, стр. 6).

6. Разнести испытуемую и вспомогательную антенны на расстояние $r = 1,5\text{м}$, причем ориентировать антенны так, чтобы они были направлены друг на друга соосно. Важно также, чтобы точки подключения к фидерам испытуемой и вспомогательной антенн находились на одинаковой высоте.

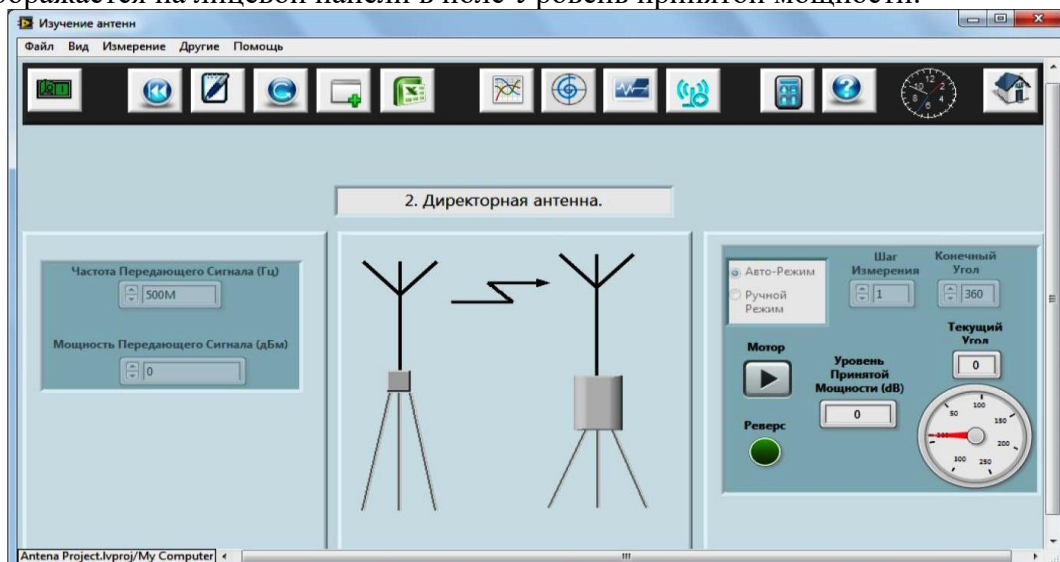
7. На лицевой панели в поле *Частота Передающего Сигнала* ввести $f = 500\text{ МГц}$ а в поле *Мощность Передающего Сигнала* - 0дБм.



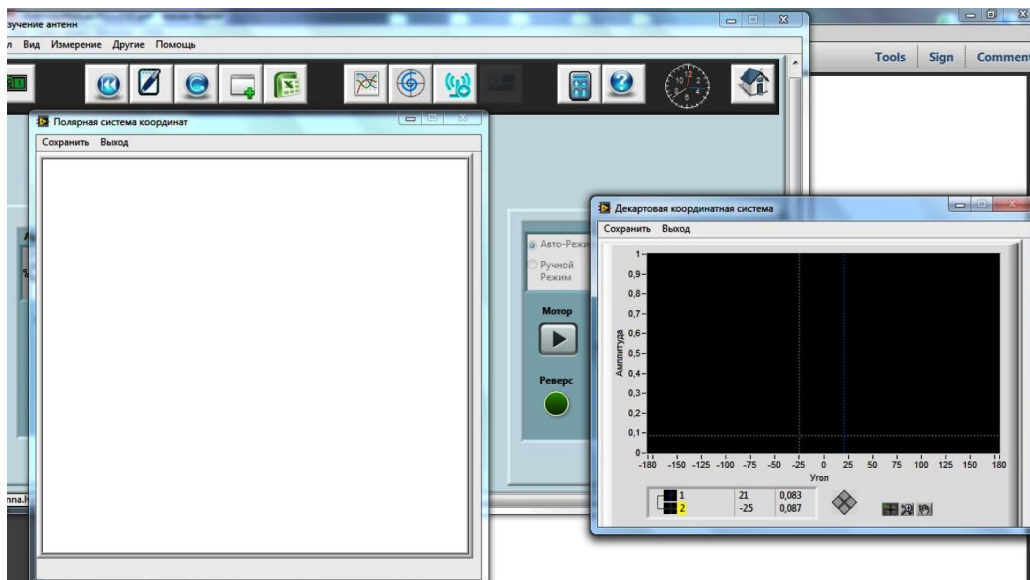
В поле *Шаг измерения* ввести необходимое значение (по умолчанию 1), соответствующее шагу измерения, в градусах, а в поле *Конечный Угол* ввести значение (по умолчанию 360) соответствующее конечному положению антенны. При достижении антенной конечного угла автоматически включается реверс, и антенна возвращается в начальное положение.



8. Запустить генератор и анализатор кнопкой **Старт** на лицевой панели. Генерируемый сигнал, через выход RF OUT генератора N1 PX1e-5673E, будет излучаться вспомогательной антенной, а испытуемая антенна будет принимать этот сигнал. Через вход RF IN анализатора N1 PX1e-5663E измеряется уровень мощности, и значение в децибелах отображается на лицевой панели в поле *Уровень принятой мощности*.



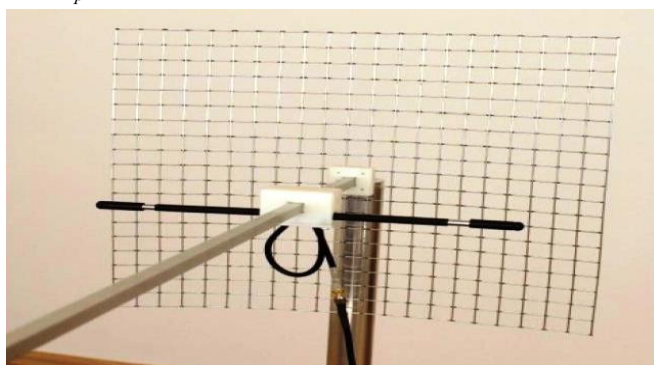
9. На панели управления открыть поля декартовой и полярной системы координат, нажав кнопки   удобно разместить эти окна на экране так, чтобы не заслонять кнопку *Мотор*.



10. Проверить расположение двух антенн по пункту 6. Запустить движение опорно-поворотного устройства нажатием кнопки **Мотор** на лицевой панели. Антенна начнёт вращаться от 0° до значения, определяемого параметром *Конечный угол* и, соответственно зафиксированному в окне на лицевой панели шагу измерения (Шаг измерения), измеряется уровень принятой мощности в децибелах, нормированные результаты измерения графически записываются параллельно в двух окнах систем координат и в отдельный шаблонный файл в формате MS Excel. Достигнув значения, определяемого параметром *Конечный угол*, ОПУ начинает реверсное вращение, в процессе которого снова измеряются значения мощности поля излучения. Кривые, полученные во время реверсного вращение, записываются в тех же графических окнах, что и при первом витке вращение испытуемой антенны (в декартовой системе координат - другим цветом).

11. Сохранить и закрыть графики двух измеренных нормированных ДН согласованной вибраторной антенны в плоскости E в регистрационной папке студента.

12. Насадить сетку (7-4) (см. 4.1. Оборудование стенда, стр. 6), которая будет служить рефлектором, на траверсу, сзади активного вибратора, на расстоянии d_p ($d_p = 0.17\lambda = 10.2$ см)



13. Надеть на траверсу со стороны, противоположной рефлектору на расстоянии d_d ($d_d = 0.25\lambda = 15$ см.), пассивную вибраторную антенну (7-1) (см. 4.1 Оборудование стенда, стр. 6), которая будет служить первым директором. Путем изменения длины плеч директора, т.е. симметрично выдвинув телескопическую конструкцию, соответственно, по обеим сторонам так, чтобы длина директора от края до края составила 29 см.

14. Надеть на траверсу со стороны первого директора на расстоянии d_{d1} от него ($d_{d1} = 0.25\lambda = 15$ см.) третью - пассивную вибраторную антенну (7-1) (см. 4.1 Оборудование стенда, стр. 6), которая будет служить вторым директором. Путем изменения длины плеч

директора, т.е. симметрично выдвинув телескопическую конструкцию, соответственно, по обеим сторонам так, чтобы длина директора от края до края составила 29 см.

15. Надеть на траверсу со стороны второго директора на расстоянии $d_{д2}$, от него ($d_{д2} = 0,25\lambda = 15$ см.) четвертую - пассивную вибраторную антенну (7-1) (см. 4.1 Оборудование стенда, стр. 6), которая будет служить третьим директором. Путем изменения длины плеч директора, т.е. симметрично выдвинув телескопическую конструкцию, соответственно, по обеим сторонам так, чтобы длина директора от края до края составила 29 см.



16. Измерить ДН директорной антенны в плоскости E , при наличии рефлектора и трех директоров, последовательно выполняя действия, указанные в п.п. 7-12.

Внимание: На лицевой панели, в поле *Шаг измерения* ввести 1, чтобы данные записывались в *Excel* файл.

17. Для обеспечения достоверности результатов, измерения ДН директорной антенны из пяти элементов повторить еще раз. В начале каждого следующего измерения необходимо нажимать кнопку **Новый сеанс** на панели управления.

18. Экспериментальные результаты автоматически перенесутся в отдельный шаблонный файл в формате MS Excel, в виде двух таблиц, чередующих друг друга. Открыть *Excel*, нажимая кнопку *Excel* на панели управления.

N	Угол (град.)	Амплитуда (dB)
0	0	-42,608
1	0	-42,811
2	1	-43,216
3	3	-44,044
4	3	-44,044
5	4	-45,798
6	5	-50,653

19. Обязательно сохранить полученные табличные данные четырех измеренных ДН в плоскости E в регистрационной папке студента.

3. Измерение ДН в плоскости Н

1. Подготовиться к измерениям ДН испытуемой директорной антенны в плоскости Н, повернув вспомогательную вибраторную антенну на 90° , установив ее в горизонтальное положение.



2. Повторить пункты (3-18) в **Измерение ДН в плоскости E**, выше.

3. Обязательно сохранить полученные табличные данные измерений в плоскости Н.

Обработка результатов измерений

1. Просчитать усредненные результаты четырех измерений ДН директорной антенны из пяти элементов в обеих плоскостях, зафиксированных в шаблонном файле формата *Excel*. Записать полученные значения в том же файле, заполнив таблицу 5 и таблицу 6. Рекомендуется внимательно проследить при заполнении таблиц за значениями функций и аргумента θ (при реверсном повороте углы изменяются в убывающем порядке).

Таблица 5

θ	$f_{E1}(\theta)$	$f_{E2}(\theta)$	$f_{E3}(\theta)$	$f_{E4}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{E1}(\theta)$	$f_{E2}(\theta)$	$f_{E3}(\theta)$	$f_{E4}(\theta)$	σ
						$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	

Таблица 6

φ	$f_{H1}(\theta)$	$f_{H2}(\theta)$	$f_{H3}(\theta)$	$f_{H4}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{H1}(\theta)$	$f_{H2}(\theta)$	$f_{H3}(\theta)$	$f_{H4}(\theta)$	σ
						$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	

2. Определить погрешность результатов измерений в обеих плоскостях по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{cp})^2}. \text{ Оценить точность измерений.}$$

3. Построить ДН антенны в обеих плоскостях по усредненным значениям функций (см. табл. 5 и табл. 6).

4. Сравнить усредненный результат измерений пятиэлементной директорной антенны в плоскости E с расчетными результатами, записанными в табл. 4.

5. Нажать кнопку **Стоп**.

6. Закончить данную лабораторную работу, **Файл>Выход**.

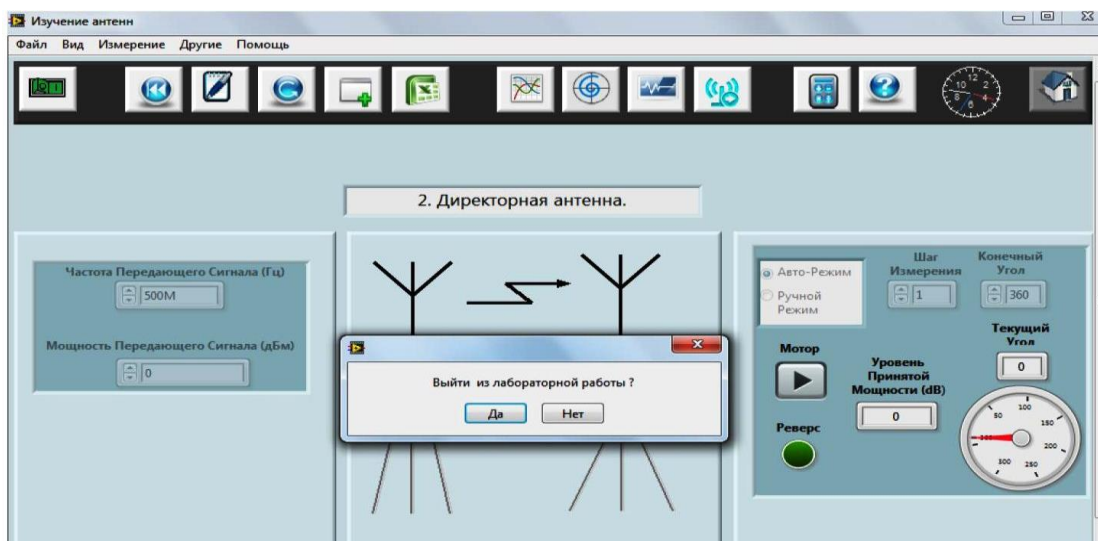
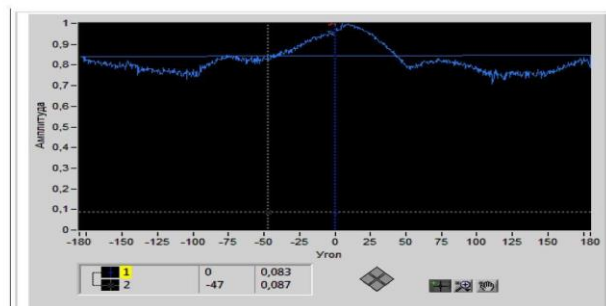
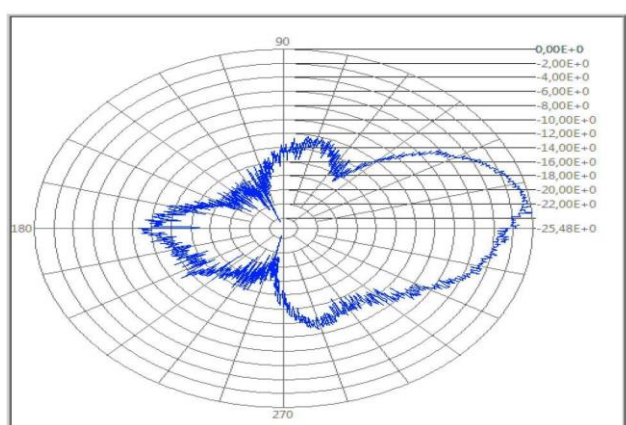


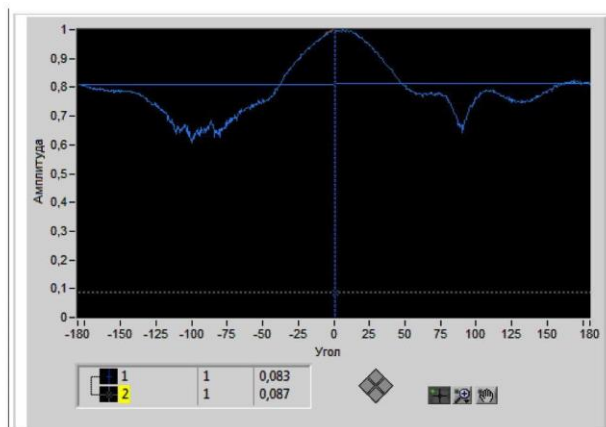
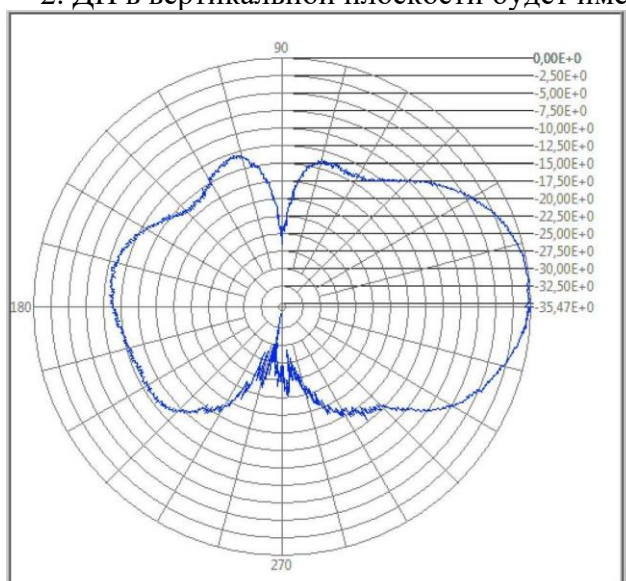
Рисунок 9. Дополнительные измерения

После выполнения опыта:

1. ДН в горизонтальной плоскости будет иметь примерно следующий вид:



2. ДН в вертикальной плоскости будет иметь примерно следующий вид:



Оборудование и материалы

1. Учебный класс с лабораторным стендом по исследованию антенн.

Указания по технике безопасности

1. К проведению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.

2. Включение лабораторных установок (компьютеров) осуществляется только с разрешения преподавателя.

3. При проведении лабораторной работы не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.

4. Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов лабораторных установок (компьютеров).

5. При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.

6. В аудитории запрещается пользоваться источниками открытого огня. При возгорании оборудования его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.

7. Стенд необходимо эксплуатировать в помещении, не подверженном воздействию факторов, повышающих опасность поражения электрическим током (повышенная влажность, отсутствие шины заземления, и т. д.).

8. Запрещается включение установки в сеть в атмосфере, содержащей горючие газы или легковоспламеняющиеся жидкости.

9. Корпус лабораторной установки должен быть заземлен. Сопротивление контура заземления не должно превышать 4 Ом. Соблюдайте общие правила техники безопасности применимые к приборам, имеющим питание от сети переменного тока.

10. При возникновении непредвиденных лабораторной работой неисправностей, а также в случае появления запаха, свидетельствующего о возгорании электрических проводов или радиокомпонентов, следует незамедлительно прекратить работу с установкой, выключив ее из сети и обратиться к обслуживающему персоналу.

11. Для исключения возможности СВЧ облучения запрещается стоять в непосредственной близости от раскрыва передающей антенны.

12. Лабораторный стенд имеет низковольтное питание. Питание подается от модулей N1 PXI.

13. Запрещается подключать к рабочему стенду другие блоки питания или производить какие-либо внешние подключения.

14. По окончании работы с лабораторным оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задание по выполнению лабораторной работы:

1. Изучить теоретический материал по учебному вопросу 1.

2. Выполнить практическое задание по учебным вопросам 2 и 3.

3. Ответить на контрольные вопросы.

4. Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета:

1. Титульный лист (образец представлен в Приложении 1).

2. Цель занятия.

3. Основные теоретические положения, изучаемого материала. Выводы по ним, подчеркивающих суть, изучаемого вопроса.

4. Перечень практических заданий. По каждому заданию представляются расчеты, обоснования (результаты исследований) и выводы по ним.

Все результаты должны быть оформлены в виде таблиц и графиков.

5. Расчетные данные (таблицы табл. 2 и табл. 4) и графики ДН.

6. Результаты экспериментальных исследований и их обработку (таблицы табл. 5 и табл. 6) и графики ДН.

Примечание: Максимальное количество баллов студент получает, если оформление отчета соответствует установленным требованиям, а отчет полностью раскрывает суть лабораторной работы. Основанием для снижения оценки являются:

- наличие ошибок, не искажающих сути, рассматриваемого вопроса;
- небрежный отчет.

Отчет может быть отправлен на доработку в следующих случаях:

- неправильные расчеты (ошибки допущенные при проведении исследований);
- не обоснованные (ошибочные) выводы;
- не полностью выполненная работа.

Контрольные вопросы:

1. Какие изменения претерпевает ДН директорной антенны при увеличении количества директоров?
2. Какую роль играет рефлектор в директорной антенне?
3. Для чего осуществляется симметрирование и какие симметрирующие устройства Вы знаете?
4. Состав директорной антенны.
5. Вид диаграммы направленности директорной антенны.

Список рекомендованной литературы:

1. Велигоша А.В. Лабораторный практикум по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».
2. Велигоша А.В. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студента по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».
3. Техническое описание лабораторного стенда по исследованию антенн.

Практическая работа 8.

Моделирование и исследование апертурных антенн.

Цель работы:

1. Ознакомление с теоретическими основами и принципом работы рупорной антенны.
2. Формирование умений по расчету и построению диаграмм направленности (ДН) и определению основных параметров направленного действия рупорных антенн с использованием специального программного обеспечения.
3. Формирование навыка измерения ДН рупорных антенн.

Учебные вопросы:

1. Устройство и принцип работы рупорной антенны.
2. Измерение ДН в плоскости E .
3. Измерение ДН в плоскости H

1. Устройство и принцип работы рупорной антенны.

В диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн широкое применение находят рупорные антенны. Они используются в качестве самостоятельных передающих и приемных антенн в радиолокации, радиорелейной связи, в измерительной аппаратуре, а также в качестве облучателей более сложных антенн, таких, как линзовые и зеркальные.

Рупорная антенна представляет собой волновод с плавно увеличивающимися размерами поперечного сечения.

Рассмотрим два типа рупорных антенн - секториальный и пирамидальный (рисунок 1):

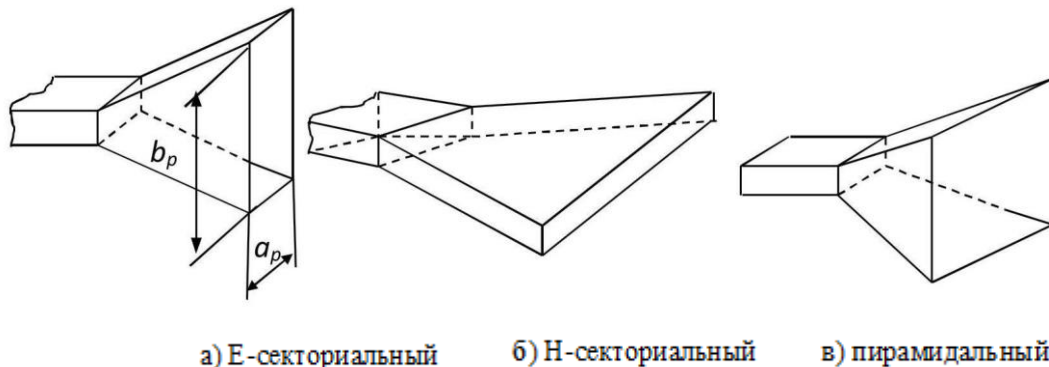


Рисунок 1. Типы рупоров

Секторальными называют рупоры, у которых расширяется только одна пара параллельных стенок питающего волновода. В зависимости от того, в какой плоскости происходит расширение, различают E - плоскостные (рисунок 1, а) и H - плоскостные секторальные рупоры (рисунок 1, б). Если расширение происходит как в плоскости E , так и в плоскости H , то рупор называется пирамидальным (рисунок 1, в). Рупоры также могут быть коническими, гофрированными и ступенчатыми.

При анализе направленных свойств рупорных антенн можно считать, что излучение происходит только с поверхности раскрыва рупора. Направленные свойства рупорных антенн, в основном, определяются размерами поверхности раскрыва и законами распределения амплитуд и фаз поля в раскрыве.

Амплитуда поля на поверхности раскрыва рупора распределена следующим образом: если угол раскрыва мал, то структура поля, а следовательно, и распределения амплитуд поля в раскрыве рупора такая же, как и в питающем волноводе. Обычно в прямоугольном волноводе возбуждается волна типа H_{10} . Закон распределения амплитуд поля в раскрыве имеет вид, представленный на рисунке 2 Распределение амплитуд поля на раскрыве рупора. Как видно из рисунка 2 Распределение амплитуд поля на раскрыве рупора, в плоскости

$E(yz)$ распределение в раскрыве равномерное, а в плоскости $H(xz)$ амплитуды распределяются по формуле $\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)$.

При таком амплитудном распределении диаграммы направленности в плоскостях Е и Н при отсутствии фазовых искажений определяются, соответственно, по формулам:

$$F_E(U) = \left| \frac{\sin U}{U} \right| \quad (1)$$

$$F_H(V) = \left| \frac{\cos V}{1 - \left(\frac{2V}{\pi}\right)^2} \right| \quad (2)$$

где $U = \frac{kl}{2} \sin \theta$, $V = \frac{kl}{2} \sin \varphi$; θ - угол, образованный нормально с поверхностью раскрыва и направлением в точке наблюдения плоскости; φ - угол плоскости; l - линейный размер раскрыва рупора ($l = b_p$ для плоскости Е и $l = a_p$ для плоскости Н); $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число; λ - длина волны в свободном пространстве.

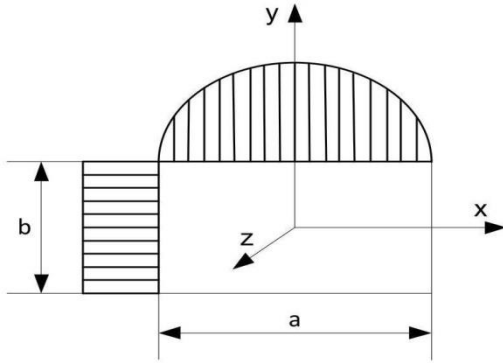


Рисунок 2. Распределение амплитуд поля на раскрыве рупора

Уровень максимума первого бокового лепестка при косинусоидальном распределении составляет 7 процентов (минус 22 дБ), а при равномерном - 22 процента (минус 12дБ).

Рассмотрим вопрос распределения фаз поля в раскрыве. Фронт волны в рупоре имеет форму цилиндрической (для секториальных) или сферической (для пирамидальных) поверхности, за счет чего значения фазы поля на краях рупора будут иными, чем в центре. Максимальная фазовая ошибка в случае секториального рупора будет на краю раскрыва $\left(x = \frac{a_p}{2}\right)$ и определяется следующим выражением:

$$\Delta\varphi_{\max} = \frac{\pi}{4} \frac{l^2}{\lambda_p R} \quad (3)$$

где λ_p - длина волны в рупоре; R - длина рупора.

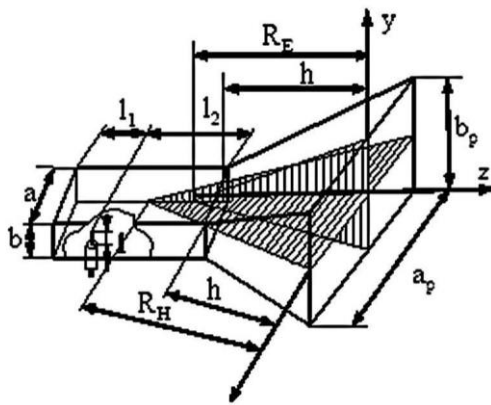


Рисунок 3. Рупорная антенна

В случае пирамидального рупора максимальное отклонение фазы напряженности поля будет в углах раскрыва рупора и определяется выражением:

$$\Delta\varphi_{\max} = \frac{\pi}{4\lambda_p} \left(\frac{\alpha_p^2}{R} + \frac{b_p^2}{R} \right) \quad (4)$$

Как видно из формул (3) и (4) $\Delta\varphi$ меняется как функция от $a_p(b_p)$ по квадратичному закону относительно оси. Следует отметить, что при увеличении размера раскрыва рупора (по отношению к λ) фазовая скорость электромагнитной волны в рупоре приближается к скорости света в свободном пространстве. Поэтому, можно принять, что фазовая скорость в раскрыве рупора приближается к скорости света в свободном пространстве и в соответствующие формулы для расчета $\Delta\varphi_{\max}$ вместо λ_p можно подставить длину волны в свободном пространстве. Нарушение синфазности излучающей поверхности приводит к искажению диаграммы направленности (ДН) и уменьшению коэффициента направленного действия (КНД) в главном направлении.

На рисунке 4 «Диаграммы направленности при различных значениях фазовых ошибок» приведены диаграммы направленности при различных значениях фазовых ошибок. Как видно из рисунка, исчезают нули между лепестками ДН, уровень боковых лепестков увеличивается, главный лепесток расширяется, и при больших $\Delta\psi$ лепестки полностью поглощаются расширяющимся главным лепестком. При $\psi \geq \pi$ появляются два направления максимального излучения, происходит раздвоение главного лепестка.

Сплошная линия соответствует равномерному закону распределения амплитуд поля в раскрыве, а пунктирная - косинусоидальному закону. При равномерном амплитудном распределении искажение ДН в плоскости Е больше, чем при косинусоидальном в плоскости Н. Поэтому, в рупорной антенне для плоскости Е допускаются меньшие фазовые ошибки, чем в плоскости Н. Обычно, за величину допустимых фазовых ошибок принимают величину $\frac{\pi}{2}$ для плоскости Е и $\frac{3}{4}\pi$ - плоскости Н.

Коэффициент направленного действия поверхностных антенн, к которым относится рупорная антенна, определяется по формуле:

$$D = x \frac{4\pi}{\lambda^2} S \quad (5)$$

где S - площадь геометрической поверхности антенны, x - коэффициент использования поверхности раскрыва (КИП). Для рупорных антенн x может достигать значения от 0,65 до 0,8. Очевидно, что при $R \rightarrow \infty$ фазовый фронт в раскрыве рупора станет плоским, эффективная площадь - равной геометрической, а $x = 1$. На практике, длину рупора выбирают исходя из допустимых фазовых ошибок в раскрыве. Длина рупора растет пропорционально $a_p^2(b_p^2)$. Такой быстрый рост длины рупора является существенным

недостатком рупорных антенн, устранение которого может быть достигнуто путем коррекции фазовых искажений, установкой линз в раскрыве рупора.

Расчетное задание

1. Рассчитать вручную и построить в декартовой системе координат нормированную ДН рупорной антенны в плоскости Е по формуле

$$F_E(U) = \left[\frac{\sin U}{U} \right],$$

где $U = \frac{kl}{2} \sin \theta$; θ - угол, образованный нормалью к поверхности раскрыва и направлением в точку наблюдения; l - линейный размер раскрыва $l = b_p$ для плоскости Е и $l = a_p$ для плоскости Н); $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число; λ – длина волны в свободном пространстве.

Расчет производить в пределах: $-90^\circ < \theta < 90^\circ$, через каждые 10° .

Определить также положение первого и второго нулей ДН (величину угла θ_0) по формуле:

$$\frac{kl}{2} \sin \theta_0 = N\pi, (N = 1; 2).$$

Данные для расчета берутся из табл. 1 в соответствии с вариантом, номер которого соответствует порядковому номеру фамилии студента в журнале.

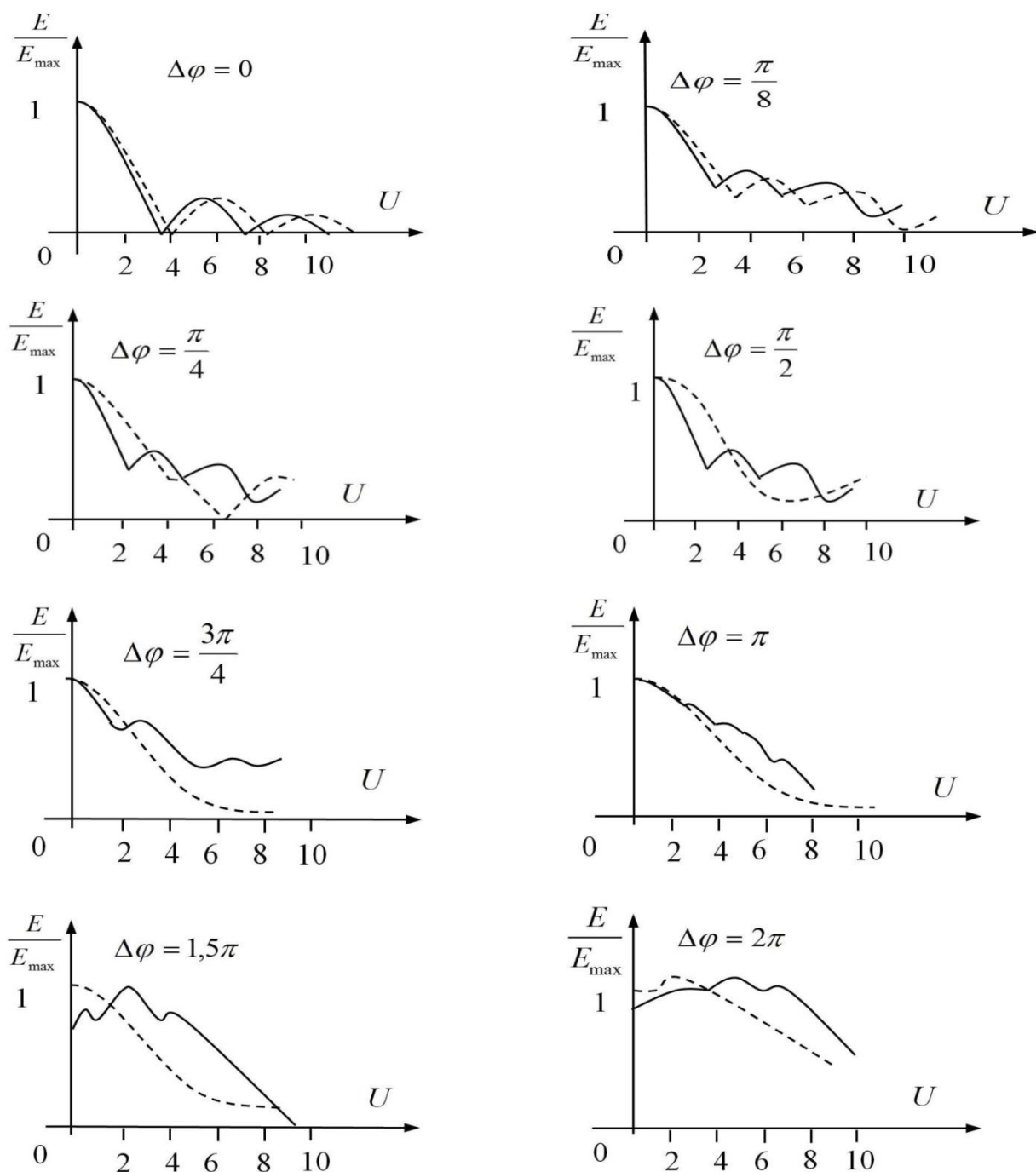


Рисунок 4. Диаграммы направленности при различных значениях фазовых ошибок

2. Рассчитать закон распределения фаз в раскрые секториальных рупоров по формуле

$$\Delta\varphi_{\max} = \frac{\pi}{4} \frac{x_p^2}{\lambda R},$$

где x_p - координата точки в раскрые рупора, отсчитываемая для Н - секториального рупора вдоль плоскости Н, а для Е - секториального рупора - вдоль плоскости Е. Закон распределения фаз в раскрые является функцией от x_p , $\Delta\varphi = f(x_p)$, где $0 \leq x_p \leq a_p$ и $0 \leq x_p \leq b_p$, соответственно, для Н и Е векториального рупора. Построить кривые для следующих значений аргумента:

$x_p = 0; 0,2(a_p, b_p); 0,4(a_p, b_p); 0,6(a_p, b_p); 0,8(a_p, b_p); 1(a_p, b_p)$.

3. Занести полученные результаты в табл.2.

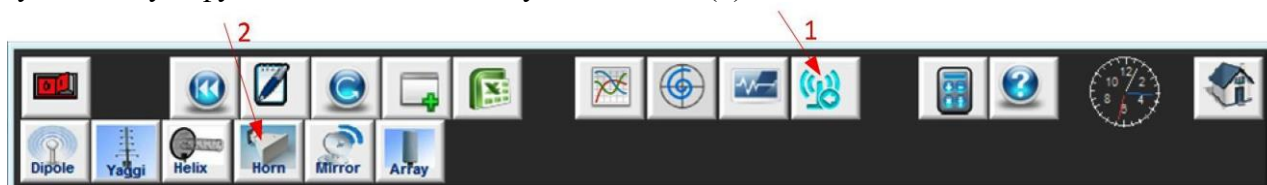
Таблица 1

Вариант			1	2	3	4	5	6	7	8
Размер раскрыва в плоскости H , a_p (см)		a_p	17	15	15	13	1	10,5	5	20
Размер раскрыва в плоскости E , b_p (см)		b_p	15	25	15	9	1.5	15	7	17
Длина рупора, R (см)		R	30	30	28	16	3	18	10	9
Длина волны, λ (см)		λ	3,2	5	6	4,5	0,8	7,5	1,5	7
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
a_p	0,8	4	40	40	50	50	15	8	7	9
b_p	1	3	30	30	50	40	25	6	8	12
R	2	5	35	38	40	50	32	7	6	10
λ	0,3	1	13	19	21	27	5,1	2	3,3	7,7

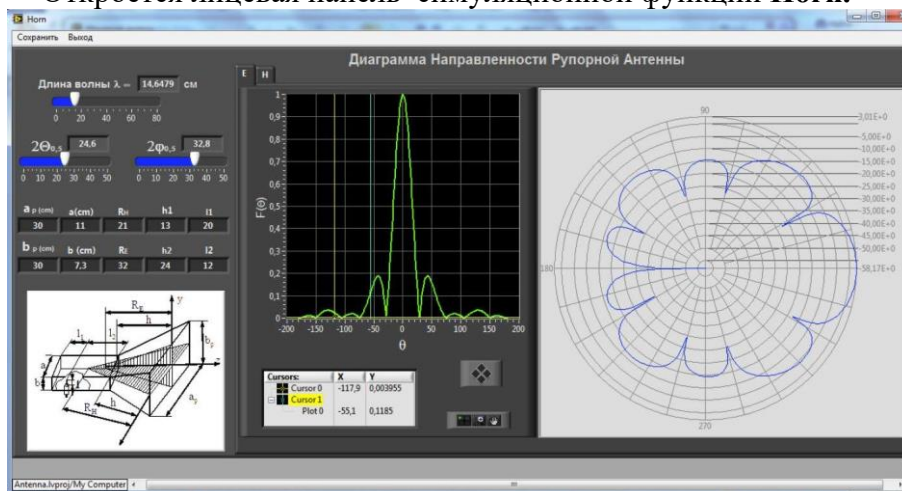
Таблица 2

Вариант	a_p	b_p	R	λ	$2\theta_{0,5}$	Положение главного лепестка, градус	Положение первого нуля, градус	Уровень первого бокового лепестка, дБ
номер								

1. Для упрощения расчетов в практикуме предлагается возможность компьютерного расчета. На панели управления щелкните по иконке (1), после чего запустите симуляционную функцию **Horn**, щелкнув по иконке (2).



Откроется лицевая панель симуляционной функции **Horn**.



2. Данные для расчета берутся из табл. 3 в соответствии с вариантом, номер которого соответствует порядковому номеру фамилии студента в журнале.

Таблица 3

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$2\theta_{0,5}$, градус	$2\theta_{0,5}$	30	30	28	36	25	42	25
		30	30	28	36	25	42	50

$2\varphi_{0,5}$, градус			$2\varphi_{0,5}$	27	20	25	30	25	32	25	40
Длина волны, λ (см)			λ	3,2	5	6	4,5	0,8	7,5	1,5	7
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
$2\theta_{0,5}$	45	35	35	38	40	50	32	27	36	19	50
$2\varphi_{0,5}$	40	32	30	28	30	45	28	25	34	15	44
λ	0,3	1	13	19	21	27	5,1	2	3,3	7,7	15

Данные вводить в лицевую панель программы, рисунок 5. После этого на графиках появятся нормированные ДН в плоскости Е и Н в декартовой и полярной системах координат.

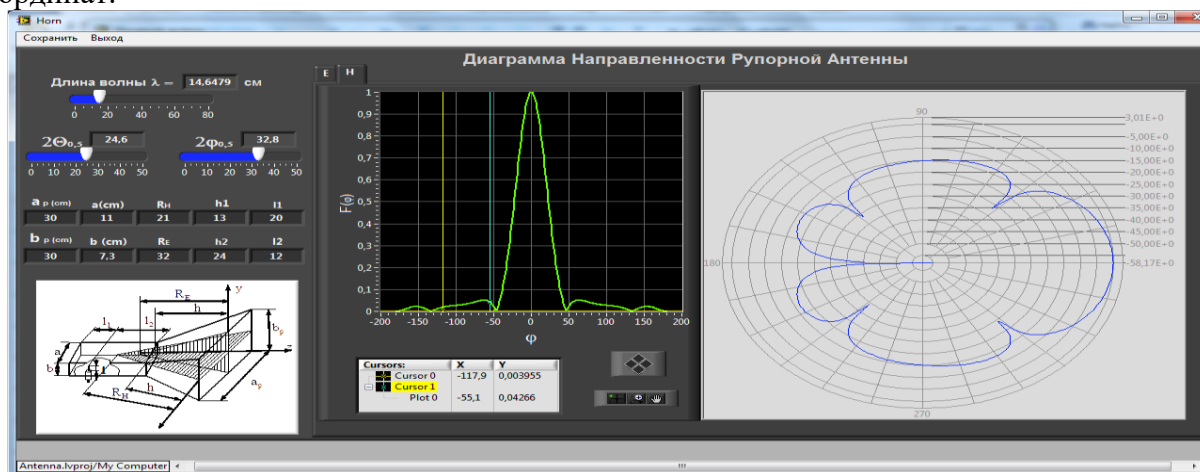


Рисунок 5. Лицевая панель программы

Определить, какими должны быть размеры рупора для случая рассчитанной нормированной ДН в плоскости E и H . Определить также уровень первого бокового лепестка в относительных единицах и в децибелах. При необходимости, воспользоваться разъяснениями в разделе 9.2 «Определение углового сектора $2\theta_{0,5}$ ($2\varphi_{0,5}$) и уровня первого бокового лепестка диаграммы направленности», стр.26. технического описания лабораторной установки или материалами лабораторной работы 1.

3. Результаты внести в табл. 4.

Таблица 4

вариант, номер	$2\theta_{0,5}$	$2\varphi_{0,5}$	λ	a	b	a_p	b_p	R_H	R_E	уровень первого бокового лепестка, дБ

4. Запомнить результаты всех расчетов и рисунки расчетных ДН. Выйти из симуляционной программы.

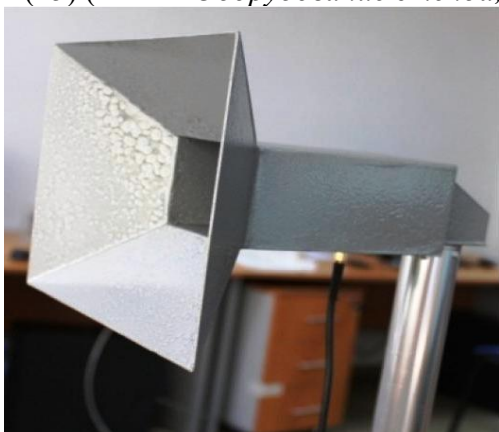
2. Измерение ДН в плоскости E

1. Установить штыревую антенну (10) (см. 4.1 *Оборудование стенда*, стр. 6) на треногу для вспомогательной антенны (см. 6.2 *Сборка стенда*, стр. 12). Подсоединить ее к выходу RF OUT генератора N1 PX1e-5673E (см. 6.3 *Сборка контрольно-измерительного оборудования*, стр.13), Использовать коаксиальный кабель (14) (см. 4.1 *Оборудование стенда*, стр. 6). Вспомогательная антенна должна быть в вертикальном положении.



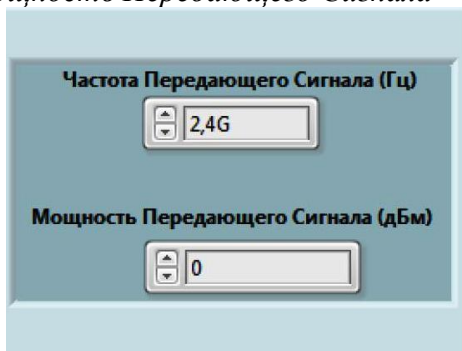
2. Установить рупорную антенну (6) (см. 4.1 *Оборудование стенда*, стр. 6) на опорно-поворотное устройство для испытуемой антенны (см. 6.2 *Сборка стенда*, стр. 12).

3. Подсоединить ее к входу RF IN анализатора N1 PX1e-5663E. Использовать коаксиальный кабель (15) (см. 4.1 *Оборудование стенда*, стр. 6).



Разнести испытуемую и вспомогательную антенны на расстояние $r = 2\text{ м}$, причем ориентировать антенны так, чтобы они были направлены друг на друга соосно. Важно также, чтобы точки подключения к фидерам испытуемой и вспомогательной антенн находились на одинаковой высоте.

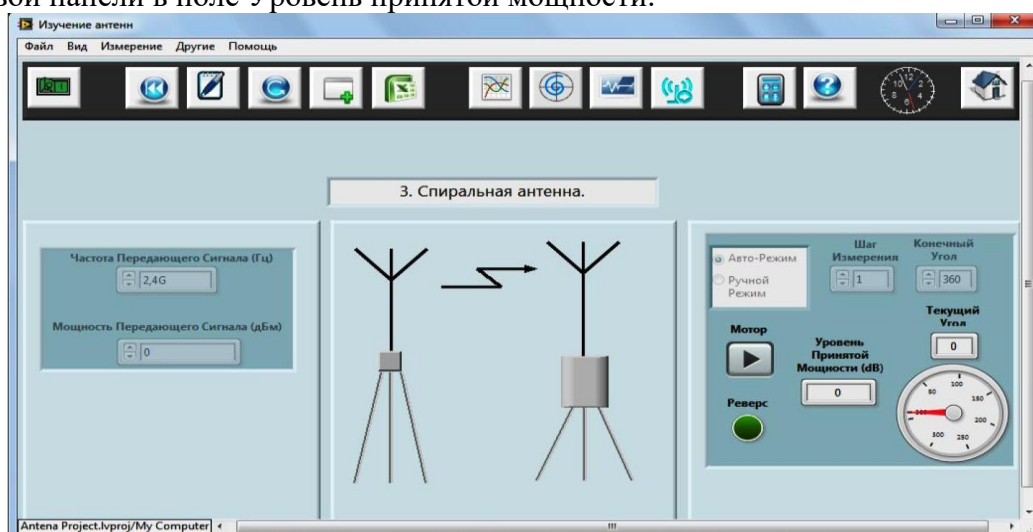
На лицевой панели в поле *Частота Передающего Сигнала* ввести $f = 2,4\text{ ГГц}$, а в поле *Мощность Передающего Сигнала* - 0дБм.



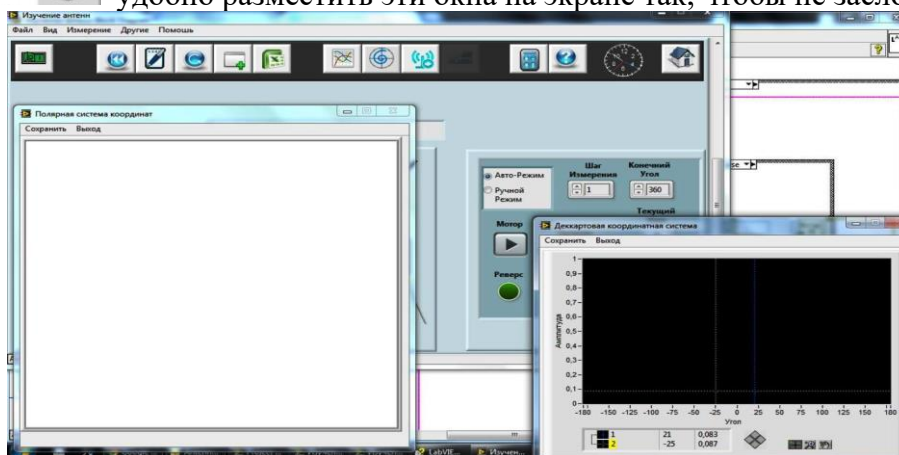
В поле *Шаг измерения* ввести необходимое значение (по умолчанию 1), соответствующее шагу измерения, в градусах, а в поле *Конечный Угол* ввести значение (по умолчанию 360) соответствующее конечному положению антенны. При достижении антенной конечного угла автоматически включается реверс, и антенна возвращается в начальное положение.



6. Запустить генератор и анализатор кнопкой Старт на лицевой панели. Генерируемый сигнал, через выход RF OUT генератора N1 PX1e-5673E, будет излучаться вспомогательной антенной, а испытуемая антенна будет принимать этот сигнал. Через вход RF IN анализатора N1 PX1e-5663E измеряется уровень мощности, и значение в децибелах отображается на лицевой панели в поле Уровень принятой мощности.



7. На панели управления открыть поля декартовой и полярной системы координат, нажав   удобно разместить эти окна на экране так, чтобы не заслонять кнопку **Мотор**.



8. Проверить расположение двух антенн по пункту 4. Запустить движение опорно-поворотного устройства нажатием кнопки **Мотор** на лицевой панели. Антенна начнёт вращаться от 0° до значения, определяемого параметром *Конечный угол* и, соответственно зафиксированному в окне на лицевой панели шагу измерения (Шаг измерения), измеряются уровень принятой мощности в децибелах, нормированные результаты измерения графически записываются параллельно в двух окнах систем координат и в отдельный шаблонный файл в формате MS Excel. Достигнув значения, определяемого параметром *Конечный угол*, ОПУ начинает реверсное вращение, в процессе которого снова измеряются значения мощности поля излучения. Кривые, полученные во время реверсного вращения, записываются в тех же

графических окнах, что и при первом витке вращения испытуемой антенны (в декартовой системе координат-другим цветом).

Для обеспечения достоверности результатов, пункт 8 повторить еще раз. В начале каждого следующего измерения необходимо нажимать кнопку **Новый сеанс**  на панели управления.

9. Сохранить измеренные графики четырех нормированных ДН в регистрационной папке студента.

10. Экспериментальные результаты автоматически перенесутся в отдельный шаблонный файл в формате MS Excel, в виде двух таблиц, чередующих друг друга.

Открыть *Excel*, нажимая кнопку шаблон Excel  на панели управления.

12. Обязательно сохранить полученные табличные данные измерений в плоскости Е.

3. Измерение ДН в плоскости Н

1. Подготовиться к измерениям ДН испытуемой рупорной антенны в плоскости Н, повернув вспомогательную вибраторную антенну на 90° по отношению к вертикали.



2. Повторите вышеуказанные п.п. 4-11.

Обязательно сохраните полученные табличные данные измерений в плоскости Н.

Обработка результатов измерений

1. Просчитать усредненные результаты четырех измерений ДН в обеих плоскостях рупорной антенны, зафиксированных в шаблонном файле формата *Excel*. Записать полученные значения в том же файле, заполнив табл. 5 и табл. 6. Рекомендуется внимательно проследить при заполнении таблиц за значениями функций и аргумента θ (при реверсном повороте углы изменяются в убывающем порядке).

Таблица 5

θ	$f_{E1}(\theta)$	$f_{E2}(\theta)$	$f_{E3}(\theta)$	$f_{E4}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{E1}(\theta)$	$f_{E2}(\theta)$	$f_{E3}(\theta)$	$f_{E4}(\theta)$	σ
						$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	

Таблица 6

φ	$f_{H1}(\theta)$	$f_{H2}(\theta)$	$f_{H3}(\theta)$	$f_{H4}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{H1}(\theta)$	$f_{H2}(\theta)$	$f_{H3}(\theta)$	$f_{H4}(\theta)$	σ
						$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	

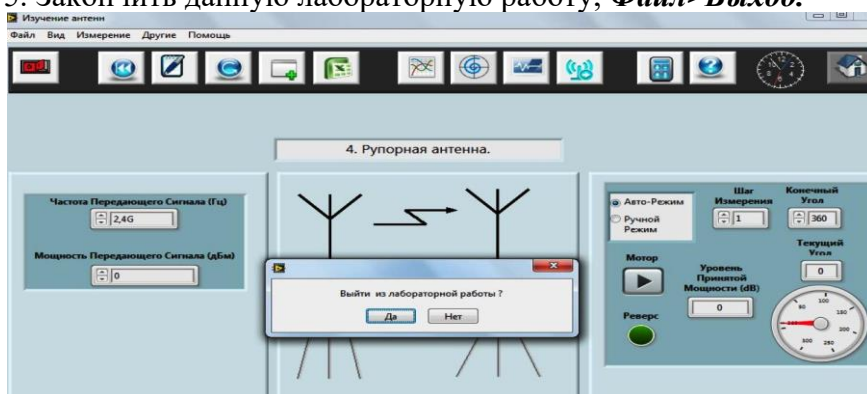
2. Определить погрешность результатов измерений в обеих плоскостях по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{cp})^2}. \text{ Оценить точность измерений.}$$

3. Построить ДН рупорной антенны в обеих плоскостях по усредненным значениям функций (см. табл. 5 и табл. 6).

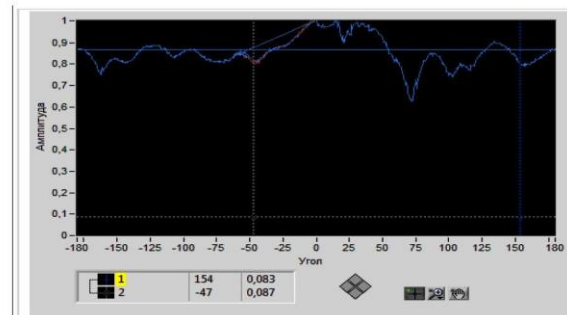
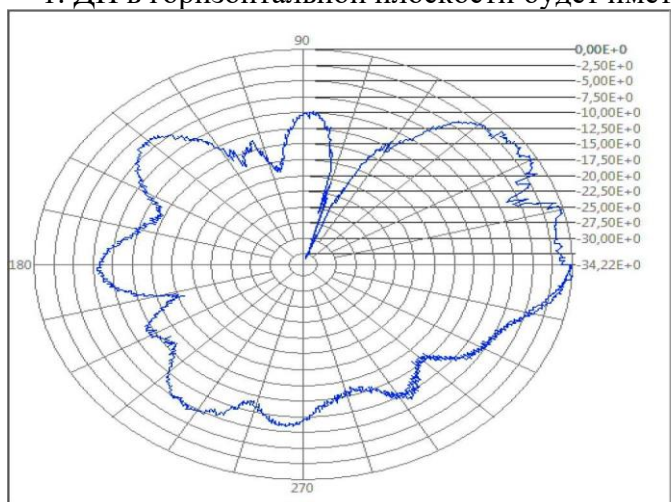
4. Нажать кнопку **Стоп**.

5. Закончить данную лабораторную работу, **Файл>Выход**.

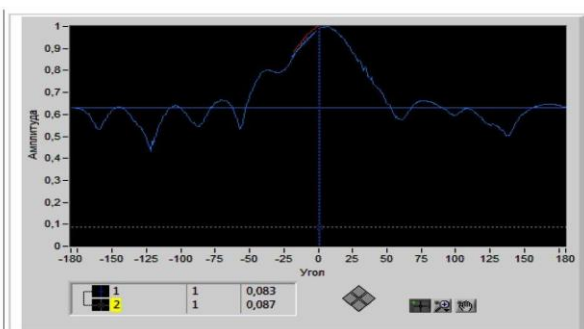
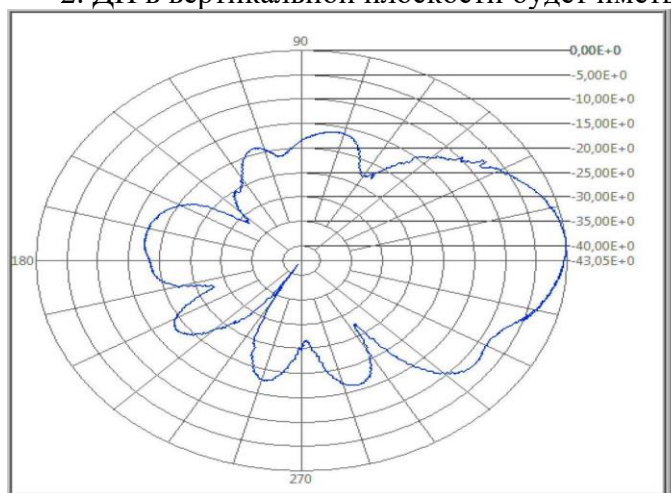


После выполнения опыта:

1. ДН в горизонтальной плоскости будет иметь примерно следующий вид:



2. ДН в вертикальной плоскости будет иметь примерно следующий вид:



Оборудование и материалы

1. Учебный класс с лабораторным стендом по исследованию антенн.

Указания по технике безопасности

1. К проведению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.

2. Включение лабораторных установок (компьютеров) осуществляется только с разрешения преподавателя.

3. При проведении лабораторной работы не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.

4. Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов лабораторных установок (компьютеров).

5. При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.

6. В аудитории запрещается пользоваться источниками открытого огня. При возгорании оборудования его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.

7. Стенд необходимо эксплуатировать в помещении, не подверженном воздействию факторов, повышающих опасность поражения электрическим током (повышенная влажность, отсутствие шины заземления, и т. д.).

8. Запрещается включение установки в сеть в атмосфере, содержащей горючие газы или легковоспламеняющиеся жидкости.

9. Корпус лабораторной установки должен быть заземлен. Сопротивление контура заземления не должно превышать 4 Ом. Соблюдайте общие правила техники безопасности применимые к приборам, имеющим питание от сети переменного тока.

10. При возникновении непредвиденных лабораторной работой неисправностей, а также в случае появлении запаха, свидетельствующего о возгорании электрических проводов или радиокомпонентов, следует незамедлительно прекратить работу с установкой, выключив ее из сети и обратиться к обслуживающему персоналу.

11. Для исключения возможности СВЧ облучения запрещается стоять в непосредственной близости от раскрыта передающей антенны.

12. Лабораторный стенд имеет низковольтное питание. Питание подается от модулей N1 PXI.

13. Запрещается подключать к рабочему стенду другие блоки питания или производить какие-либо внешние подключения.

14. По окончании работы с лабораторным оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задание по выполнению лабораторной работы:

1. Изучить теоретический материал по учебному вопросу 1.
2. Выполнить практическое задание по учебным вопросам 2 и 3.
3. Ответить на контрольные вопросы.
4. Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета по лабораторной работе:

1. Титульный лист (образец представлен в Приложении 1).
2. Цель занятия.
3. Основные теоретические положения, изучаемого материала. Выводы по ним, подчеркивающих суть, изучаемого вопроса.
4. Перечень практических заданий. По каждому заданию представляются расчеты, обоснования (результаты исследований) и выводы по ним.
5. Расчетные данные (табл. 2 - табл. 4) и графики расчетных ДН в обеих плоскостях, а также кривые закона распределения фаз в обеих плоскостях.
6. Результаты экспериментальных исследований и их обработку (табл. 5 и табл. 6) и графики ДН.

Все результаты должны быть оформлены в виде таблиц и графиков.

Примечание: Максимальное количество баллов студент получает, если оформление отчета соответствует установленным требованиям, а отчет полностью раскрывает суть лабораторной работы. Основанием для снижения оценки являются:

- наличие ошибок, не искажающих сути, рассматриваемого вопроса;
- небрежный отчет.

Отчет может быть отправлен на доработку в следующих случаях:

- неправильные расчеты (ошибки допущенные при проведении исследований);
- не обоснованные (ошибочные) выводы;
- не полностью выполненная работа.

Контрольные вопросы:

1. Какова структура поля в E - плоскостном секториальном рупоре?
2. Какова структура поля в H - плоскостном секториальном рупоре?
3. Какими факторами определяется ширина ДН рупорной антенны?
4. Каков закон распределения амплитуды напряженности поля на излучающей поверхности рупора?
5. Каков закон распределения фазы напряженности поля на излучающей поверхности рупора?
6. Как влияет амплитудное распределение в раскрыве антенны на форму ее ДН?
7. Как влияют фазовые искажения на форму ДН?
8. В какой плоскости (E или H) для рупора с квадратным раскрывом ($a=b$) ДН шире и почему?
9. Из каких соображений выбираются размеры излучающей поверхности и длина рупора?
10. Почему допускаемые фазовые искажения для E и H плоскостных рупоров имеют разную величину?
11. Чем определяется КНД рупорной антенны?

Список рекомендованной литературы:

1. Велигоша А.В. Лабораторный практикум по дисциплине «Антенно-фидерные устройства», стр. 85 – 103.
2. Велигоша А.В. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студента по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».
3. Техническое описание лабораторного стенда по исследованию антенн.

Практическая работа 8.2

Моделирование и исследование апертурных антенн

Цель работы:

1. Ознакомление с теоретическими основами и принципом работы зеркальной параболической антенны.
2. Формирование умений по расчету и построению диаграмм направленности (ДН) и определение основных параметров направленного действия зеркальных параболических антенн с использованием специального программного обеспечения.
3. Формирование навыка измерения ДН зеркальных параболических антенн

Учебные вопросы:

1. Устройство и принцип работы зеркальной параболической антенны.
2. Измерение ДН в плоскости E .
3. Измерение ДН в плоскости H .

1. Устройство и принцип работы зеркальной параболической антенны.

Зеркальные антенны применяются в различных диапазонах волн: от оптического до УКВ. Широкое использование зеркальных антенн объясняется простотой их конструкции, возможностью получения различного типа диаграмм направленности, высоким КПД, малой шумовой температурой, хорошими диапазонными свойствами и. т.д.

Существуют различные типы зеркальных антенн: одно-, двух- и многозеркальные, с главным зеркалом параболической, сферической и других форм.

Параболические зеркальные антенны могут выполняться в виде параболоида вращения, параболического цилиндра, ограниченного параллельными проводящими плоскостями или сегментно-параболических (рисунки 1 Типы зеркальных параболических антенн).

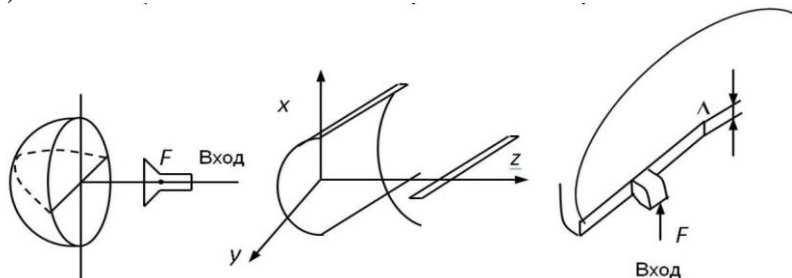


Рисунок 1. Типы зеркальных параболических антенн

Параболоид вращения возбуждается слабонаправленным облучателем (например, рупором или вибратором с рефлектором), помещенным в фокусе, и преобразовывает сферический фронт волны облучателя в плоский. Параболический цилиндр возбуждается линейной антенной, помещенной на фокальной линии, и преобразовывает цилиндрический фронт волны в плоский.

Парабола обладает свойством, при котором лучи, направленные из фокуса и отраженные от параболы, становятся параллельными оси параболы так, что длина пути от фокуса до параболы и затем до плоскости раскрытия одинакова для любого угла α .

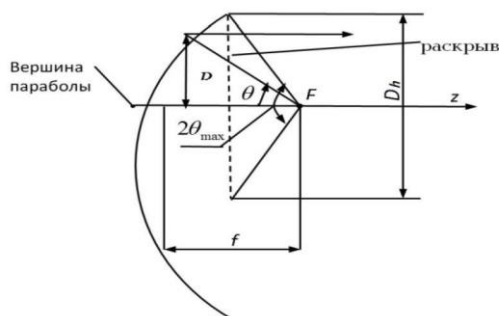


Рисунок 2. Вид зеркальной параболической антенны в раскрытии

Таким образом, в раскрытии параболы образуется синфазная поверхность, и излучение антенны оказывается остронаправленным.

В качестве облучателей применяются слабонаправленные антенны. Фазовый центр облучателя совмещается с точкой фокуса зеркала. При этом, облучатель должен создавать в пределах угла раскрытия зеркала сферическую или близкую к ней волну. Желательно, чтобы поперечные размеры облучателя были минимальными во избежание затенения раскрытия. ДН облучателя должна обеспечить требуемое амплитудное распределение в раскрытии при малом переливании энергии через края зеркала, по возможности, обладать осевой симметрией и минимальным уровнем боковых и задних лепестков. Диапазонные свойства параболической антенны, в основном, зависят от облучателя. Облучатель и его тракт питания следует рассчитывать и конструировать таким образом, чтобы заданная мощность пропусклась без возможности пробоя диэлектрика.

Наряду с вибраторами и рупором применяются облучатели щелевые, спиральные, открытый конец волновода.

В данной лабораторной работе в качестве облучателя используется вибраторная антенна.

На ДН зеркальной антенны влияет также точность изготовления. При неточном исполнении антенны возникают фазовые ошибки. Обеспечение синфазности возбуждения раскрытия, обычно, считают достаточным при точности $\pm \frac{\pi}{8}$. При этом, потери коэффициента усиления антенны не превышают нескольких процентов.

Путем перемещения облучателя перпендикулярно фокальной оси можно изменить направление максимального излучения и управлять диаграммой направленности зеркальной антенны. Отклонение направления максимального излучения противоположно направлению смещения (рисунок 3 Диаграммы направленности зеркальной параболической антенны).

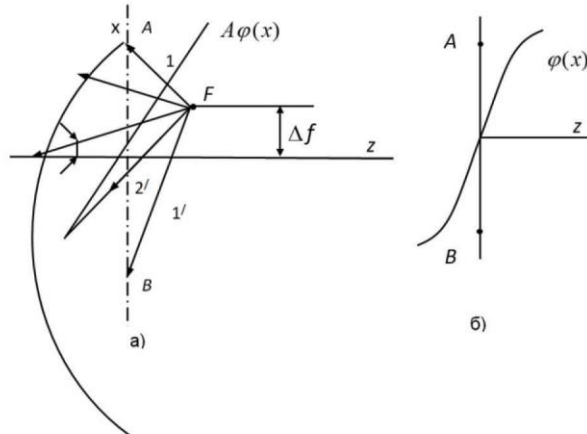


Рисунок 3. Диаграммы направленности зеркальной параболической антенны

Такое отклонение луча называется электромеханическим сканированием. Возможный угол электромеханического сканирования ограничен кубическими фазовыми ошибками в раскрытии.

Главный лепесток при этом расширяется, становится несимметричным относительно своего максимума, уровень боковых лепестков со стороны, противоположной смещению ДН, резко возрастает (рисунок 3 Диаграммы направленности зеркальной параболической антенны, б). Возможность электромеханического сканирования больше у длиннофокусных антенн, но практически не превышает $(10^0 - 20^0) \theta_{0,5}$. Под большими углами ДН недопустимо искажается, а КНД - падает.

Расчетное задание

1. Вручную рассчитать ширину ДН параболической антенны по половинной мощности в Е и Н плоскостях по формулам

$$2\theta_{0,5}^E = 75^\circ \frac{\lambda}{D},$$

$$2\varphi_{0,5}^H = 70^\circ \frac{\lambda}{D}$$

где D - диаметр раскрыва антенны.

2. Рассчитать закон распределения фаз поля в раскрыве антенны при выносе облучателя вдоль оси на величину Δf по формуле:

$$\Delta\psi = k2\Delta f \left(1 - \frac{p_s^2}{[(2f)^2 + p_s^2]} \right)$$

где f - фокусное расстояние; p_s - текущая координата по z (изменяется от нуля до $p_s = \frac{D}{2}$

с шагом $\Delta p_s = \frac{D}{10}$); $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число; Δf - смещение вдоль оси от зеркала ($\Delta f = 3$ см).

Данные для расчета берутся из табл.1 в соответствии с вариантом, номер которого соответствует порядковому номеру фамилии студента в журнале.

Таблица 1

Вариант				1	2	3	4	5	6	7	8
Длина волны λ , м		λ		0.32	0.05	0.1	0.15	0.2	0.22	0.25	0.2
Диаметр зеркала, D , м		D		5	1	12	6	30	62	100	2
Фокусное расстояние, f , м		f		0.5	0.3	4	3	5	10	20	1
Угол поворота ДН α , градус		α		5	5	5	5	5	5	5	5
9		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
λ	0.03	0.025	0.001	0.12	0.06	0.004	0.04	0.15	0.015	0.24	0.07
D	54	35	64	76	80	52	30	120	30	200	20
f	20	10	15	30	25	20	7	100	4	120	10
α	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

3. Рассчитать смещение облучателя (Δ) при выносе облучателя поперек оси по формуле

$$\Delta = f \operatorname{tg} \alpha$$

где f - фокусное расстояние; α - угол поворота ДН при электромеханическом сканировании.

3. Рассчитать КУ антенны по формуле:

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

где $S_{\text{эф.}}$ - эффективная площадь антенны: $S_{\text{эф.}} = S_\chi$; η - коэффициент полезного действия ($\eta = 1$); χ - коэффициент использования поверхности ($\chi = 0,5$).

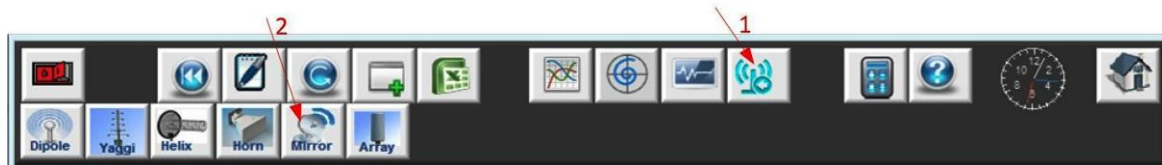
Занести полученные результаты в табл. 2.

Таблица 2

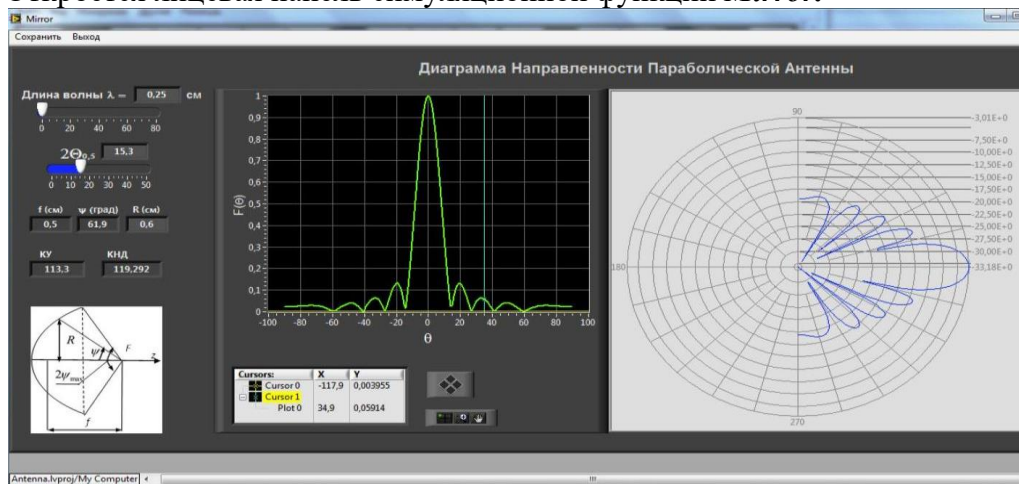
Вариант номер	λ	D	f	α	$2\theta_{0,5}$, градус	$2\varphi_{0,5}$, градус	Δ	G
------------------	-----------	-----	-----	----------	--------------------------	---------------------------	----------	-----

--	--	--	--	--	--	--	--	--

1. Для упрощения расчетов, в практикуме предлагается возможность компьютерного расчета. На панели управления щелкните по иконке (1), после чего запустите симуляционную функцию **Mirror**, щелкнув по иконке (2).



Откроется лицевая панель симуляционной функции **Mirror**.



2. Данные для расчета берутся из табл. 3 в соответствии с вариантом.

Таблица 3

Вариант				1	2	3	4	5	6	7	8
$2\theta_{0,5}$, градус			$2\theta_{0,5}$	15	25	24	18	10	35	15	40
Длина волны, λ (см)			λ	3,2	5	6	4,5	0,8	7,5	1,5	7
9		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$2\theta_{0,5}$	7	8	45	47	50	50	22	5	4	7	30
λ	0,3	1	13	19	21	27	5,1	2	3,3	1,1	15

Данные вводить в лицевую панель программы, рисунок 4. После чего, на графике появится нормированная ДН в плоскости E в декартовой и полярной системах координат.

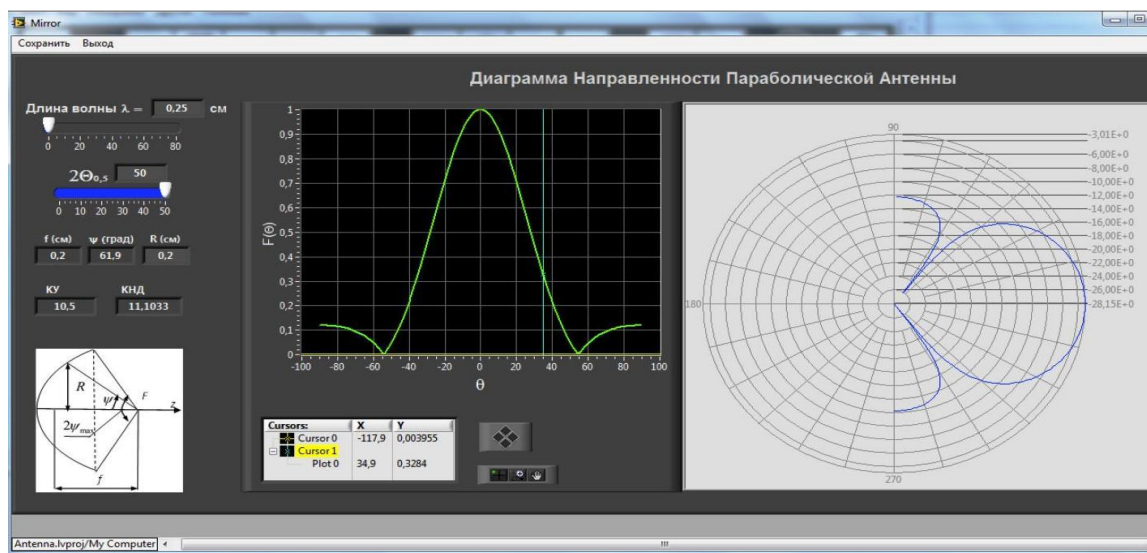


Рисунок 4. Лицевая панель программы

3. Определить, какими должны быть размеры зеркальной антенны для случая рассчитанной нормированной ДН. Определить также уровень первого бокового лепестка в относительных единицах и в децибелах. При необходимости, воспользоваться разъяснениями из раздела 9.2. Определить угловой сектор $2\theta_{0.5}$ ($2\phi_{0.5}$) и уровня первого бокового лепестка диаграммы направленности, стр. 26 технического описания лабораторного стенда или материалами лабораторной работы 1.

4. Результаты внести в табл. 4.

Таблица 4

Вариант		R	f	Уровень первого бокового лепестка в относительных единицах	Уровень первого бокового лепестка в децибелах
λ					
$2\theta_{0.5}$					

5. Запомнить результаты всех расчетов и рисунки расчетных ДН. Выйти из симуляционной программы.

2. Измерение ДН в плоскости E

1. Установить штыревую антенну (10) (см. 4.1 Оборудование стенда, стр. 6) на треногу для вспомогательной антенны (см. 6.2 Сборка стенда, стр. 12).



2. Подсоединить ее к выходу RF OUT генератора N1 PX1e-5673E (см. 6.3 Сборка контрольно- измерительного оборудования, стр.13). Использовать коаксиальный кабель

(14) (см. 4.1 *Оборудование стенда*, стр. 6). Вспомогательная антенна должна быть в вертикальном положении.

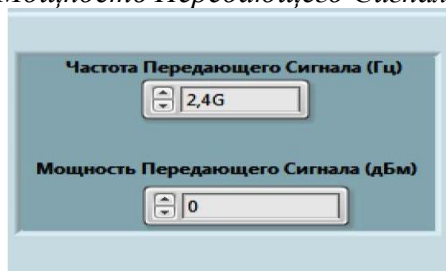
3. Установить зеркальную антенну на опорно-поворотное устройство для испытуемой антенны (см. 6.2 *Сборка стенда*, стр. 12). Важно проследить за положением облучателя параболического зеркала. Вибраторный облучатель испытуемой зеркальной антенны должен быть в вертикальном положении. Необходимо проследить, чтобы метки на облучателе и ответной части зеркала совпадали.



4. Подсоединить зеркальную антенну к анализатору. Использовать коаксиальный кабель (15) (см. 4.1. *Оборудование стенда*, стр. 6).

5. Разнести испытуемую и вспомогательную антенны на расстояние $r = 2$ м, причем, ориентировать антенны так, чтобы они были направлены друг на друга соосно. Важно также, чтобы точки подключения к фидерам облучателя испытуемой зеркальной антенны и вспомогательной антенны находились на одинаковой высоте.

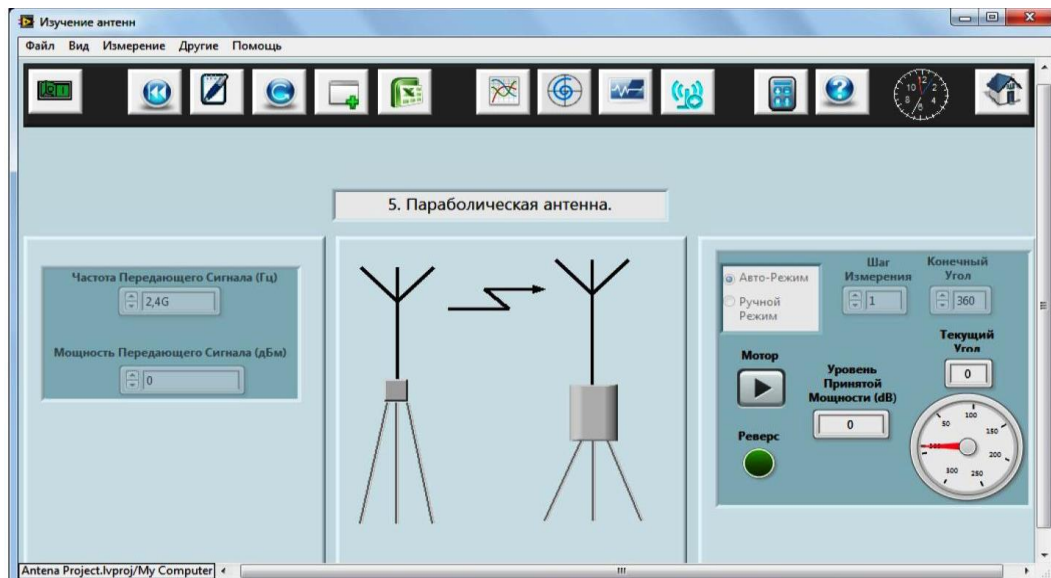
6. На лицевой панели в поле *Частота Передающего Сигнала* ввести $f = 2,4$ ГГц, а в поле *Мощность Передающего Сигнала* - 0 дБм.



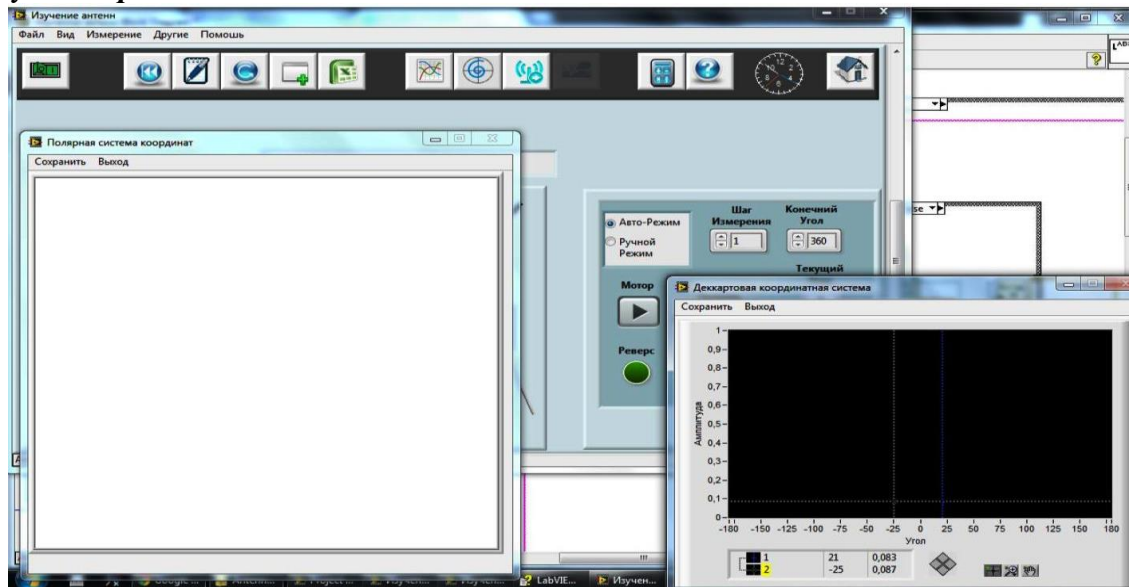
В поле *Шаг измерения* ввести необходимое значение (по умолчанию 1), соответствующее шагу измерения, в градусах, а в поле *Конечный Угол* ввести значение (по умолчанию 360) соответствующее конечному положению антенны. При достижении антенной конечного угла автоматически включается реверс, и антенна возвращается в начальное положение.



7. Запустить генератор и анализатор кнопкой *Старт* на лицевой панели. Генерируемый сигнал, через выход RF OUT генератора N1 PX1e-5673E, будет излучаться вспомогательной антенной, а испытуемая антенна будет принимать этот сигнал. Через вход RF IN анализатора N1 PX1e- 5663E измеряется уровень мощности, и значение в децибелах отображается на лицевой панели в поле *Уровень принятой мощности*.



8. На панели управления открыть поля декартовой и полярной системы координат, нажав кнопки   удобно разместить эти окна на экране так, чтобы не заслонять кнопку **Мотор**.



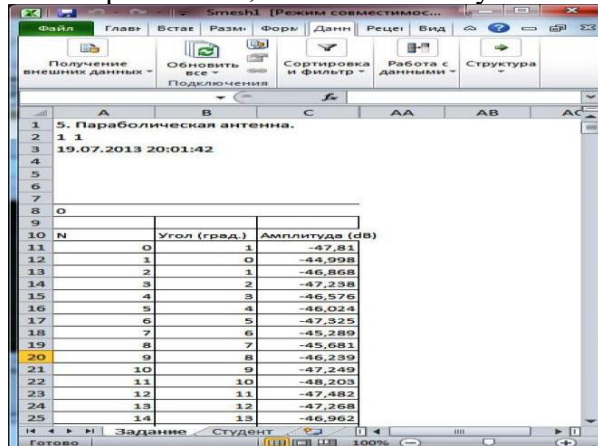
9. Проверить расположение двух антенн по пункту 5. Запустить движение опорно-поворотного устройства нажатием кнопки **Мотор** на лицевой панели. Антенна начнёт вращаться от 0° до значения, определяемого параметром *Конечный угол* и, соответственно зафиксированному в окне на лицевой панели шагу измерения (Шаг измерения), измеряются уровень принятой мощности в децибелах, нормированные результаты измерения графически записываются параллельно в двух окнах систем координат и в отдельный шаблонный файл в формате MS Excel. Достигнув значения, определяемого параметром *Конечный угол*, ОПУ начинает реверсное вращение, в процессе которого снова измеряются значения мощности поля излучения. Кривые, полученные во время реверсного вращении, записываются в тех же графических окнах, что и при первом витке вращении испытуемой антенны (в декартовой системе координат - другим цветом).

10. Для обеспечения достоверности результатов, пункт 9 повторить еще раз. В начале каждого следующего измерения необходимо нажимать кнопку **Новый сеанс**  на панели управления.

11. Сохранить измеренные графики четырех нормированных ДН в регистрационной папке студента.

12. Экспериментальные результаты автоматически перенесутся в отдельный шаблонный файл в формате MS Excel, в виде двух таблиц, чередующих друг друга.

13. Открыть *Excel*, нажимая кнопку шаблон *Excel*  на панели управления.



N	Угол (град)	Амплитуда (дБ)
1	0	-47,81
2	1	-44,998
3	2	-46,868
4	3	-47,238
5	4	-46,576
6	5	-46,024
7	6	-47,325
8	7	-45,289
9	8	-45,681
10	9	-46,239
11	10	-47,249
12	11	-48,203
13	12	-47,482
14	13	-47,268
15	14	-46,962

Обязательно сохранить полученные табличные данные измерений в плоскости.

3. Измерение ДН в плоскости Н

1. Подготовиться к измерениям ДН испытуемой зеркальной антенны в плоскости Н, повернув вспомогательную штыверную антенну на 90° по отношению к вертикали.



2. Повторите вышеуказанные пункты 3-13.

3. Обязательно сохраните полученные табличные данные измерений в плоскости Н.

Измерение ДН с вынесенным из фокуса облучателем

1. Подготовиться к измерениям ДН испытуемой зеркальной антенны в случае вынесенного из фокуса облучателя, выдвинув несущую конструкцию облучателя на одно деление (1см), затем на два деления (2см) вперед, удаляя облучатель от поверхности зеркала.

2. Повторите п.п. 5-13 из **Измерение ДН в плоскости E** и п.п. 1-3 из **Измерение ДН в плоскости E** для каждого из положений облучателя.

3. Обязательно сохраните полученные табличные данные измерений с вынесенным облучателем.

Обработка результатов измерений

1. Просчитать усредненные результаты четырех измерений ДН во всех трех случаях измерений (облучатель находится в фокусе, облучатель вынесен из фокуса на одно деление, и облучатель вынесен на два деления), зафиксированных в шаблонном файле формата *Excel*. Записать полученные значения в том же файле, заполнив таблицы: табл. 5, табл. 6, табл. 7. Советуем внимательно проследить при заполнении таблиц за значениями функций и аргумента θ (при реверсном повороте углы изменяются в убывающем порядке).

Таблица 5

θ	$f_{E1}(\theta)$	$f_{E2}(\theta)$	$f_{E3}(\theta)$	$f_{E4}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{E1}(\theta)$	$f_{E2}(\theta)$	$f_{E3}(\theta)$	$f_{E4}(\theta)$	σ
						$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	

Таблица 6

φ	$f_{H1}(\theta)$	$f_{H2}(\theta)$	$f_{H3}(\theta)$	$f_{H4}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{H1}(\theta)$	$f_{H2}(\theta)$	$f_{H3}(\theta)$	$f_{H4}(\theta)$	σ
						$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	

Таблица 7

θ	$f_{E1}(\theta)$	$f_{E2}(\theta)$	$f_{E3}(\theta)$	$f_{E4}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{E1}(\theta)$	$f_{E2}(\theta)$	$f_{E3}(\theta)$	$f_{E4}(\theta)$	σ
						$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	

2. Определить погрешность результатов измерений в обеих плоскостях по формуле:

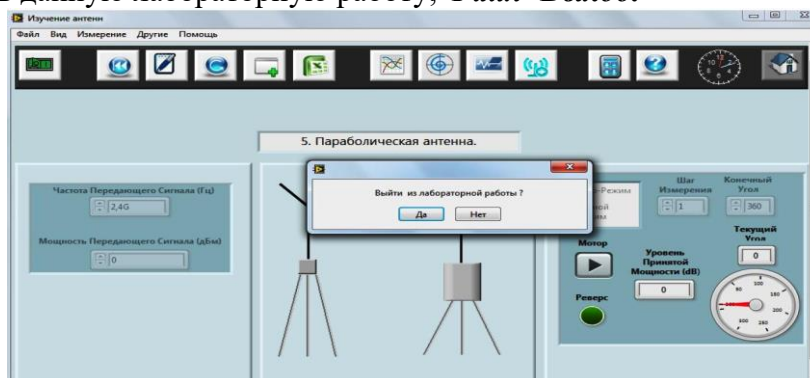
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{cp})^2}. \text{ Оценить точность измерений.}$$

3. Построить ДН антенны для всех случаев по усредненным значениям функций (табл. 5, табл. 6, табл. 7).

4. Сравнить усредненные результаты измерений в плоскости Е для случаев: облучатель находится в фокусе, облучатель вынесен из фокуса на одно деление и облучатель вынесен на два деления, сделать соответствующие выводы.

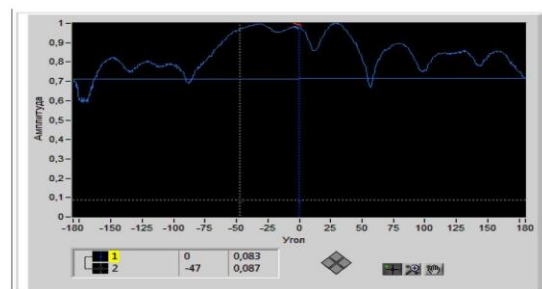
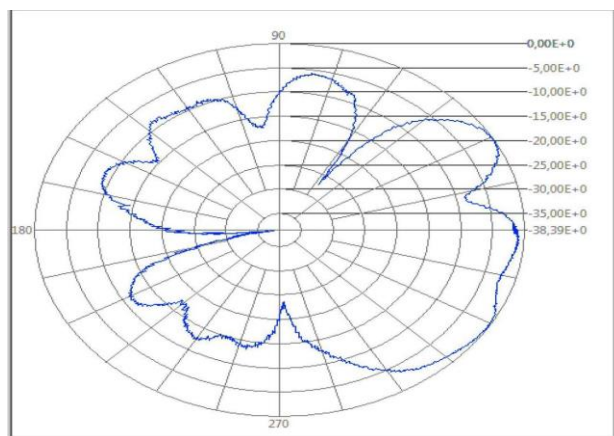
5. Нажать кнопку **Стоп**.

6. Закончить данную лабораторную работу, **Файл>Выход**.

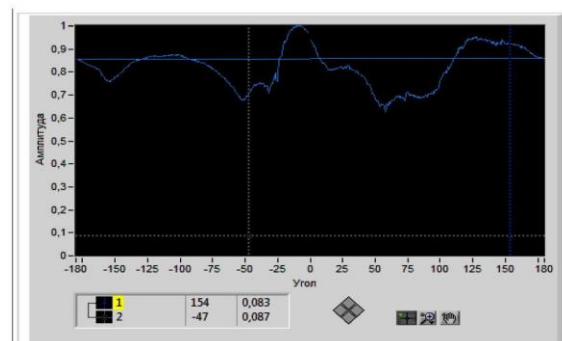
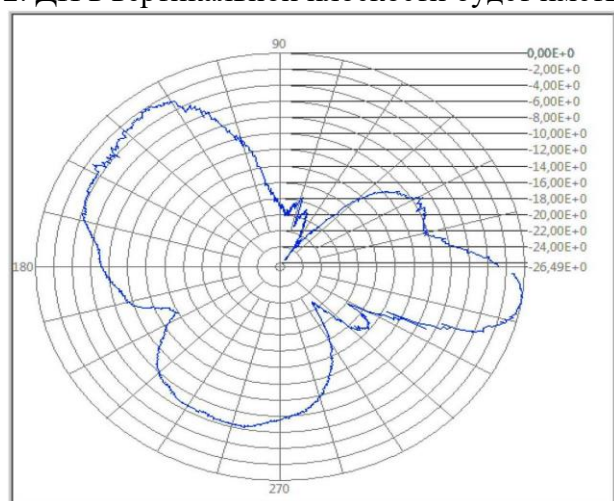


После выполнения опыта:

1. ДН в горизонтальной плоскости будет иметь примерно следующий вид:



2. ДН в вертикальной плоскости будет иметь примерно следующий вид:



Оборудование и материалы

1. Учебный класс с лабораторным стендом по исследованию антенн.

Указания по технике безопасности

1. К проведению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.

2. Включение лабораторных установок (компьютеров) осуществляется только с разрешения преподавателя.

3. При проведении лабораторной работы не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.

4. Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов лабораторных установок (компьютеров).

5. При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.

6. В аудитории запрещается пользоваться источниками открытого огня. При возгорании оборудования его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.

7. Стенд необходимо эксплуатировать в помещении, не подверженном воздействию факторов, повышающих опасность поражения электрическим током (повышенная влажность, отсутствие шины заземления, и т. д.).

8. Запрещается включение установки в сеть в атмосфере, содержащей горючие газы или легковоспламеняющиеся жидкости.

9. Корпус лабораторной установки должен быть заземлен. Сопротивление контура заземления не должно превышать 4 Ом. Соблюдайте общие правила техники безопасности применимые к приборам, имеющим питание от сети переменного тока.

10. При возникновении непредвиденных лабораторной работой неисправностей, а также в случае появлении запаха, свидетельствующего о возгорании электрических проводов или радиокомпонентов, следует незамедлительно прекратить работу с установкой, выключив ее из сети и обратиться к обслуживающему персоналу.

11. Для исключения возможности СВЧ облучения запрещается стоять в непосредственной близости от раскрыва передающей антенны.

12. Лабораторный стенд имеет низковольтное питание. Питание подается от модулей N1 PXI.

13. Запрещается подключать к рабочему стенду другие блоки питания или производить какие-либо внешние подключения.

14. По окончании работы с лабораторным оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задание по выполнению лабораторной работы:

1. Изучить теоретический материал по учебному вопросу 1.
2. Выполнить практическое задание по учебным вопросам 2 и 3.
3. Ответить на контрольные вопросы.
4. Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета по лабораторной работе:

1. Титульный лист (образец представлен в Приложении 1).
2. Цель занятия.
3. Основные теоретические положения, изучаемого материала. Выводы по ним, подчеркивающих суть, изучаемого вопроса.
4. Перечень практических заданий. По каждому заданию представляются расчеты, обоснования (результаты исследований) и выводы по ним.
5. Расчетные данные (табл. 2 - табл. 4) и кривую закона распределения фаз в раскрыве антенны.
6. Результаты экспериментальных исследований и их обработку (табл. 5 - табл. 7) и графики ДН.

Все результаты должны быть оформлены в виде таблиц и графиков.

Примечание: Максимальное количество баллов студент получает, если оформление отчета соответствует установленным требованиям, а отчет полностью раскрывает суть лабораторной работы. Основанием для снижения оценки являются:

- наличие ошибок, не искажающих сути, рассматриваемого вопроса;
- небрежный отчет.

Отчет может быть отправлен на доработку в следующих случаях:

- неправильные расчеты (ошибки допущенные при проведении исследований);
- не обоснованные (ошибочные) выводы;
- не полностью выполненная работа.

Контрольные вопросы

1. Что такое токовый и апертурный методы расчета ДН?
2. Как связана ширина ДН с размерами антенны?
3. Как связано распределение поля в раскрыве параболоида с ДН облучателя?
4. Изобразите распределение тока на поверхности короткофокусного и длиннофокусного параболоидов. Что такое перекрестная поляризация?
5. Какие существуют типы облучателей параболических зеркал?
6. Как влияет на характеристики излучения затенение раскрыва облучателем?
7. Как влияет на ДН смещение облучателя из фокуса вдоль оптической оси?
8. Как влияет на ДН смещение облучателя из фокуса перпендикулярно оптической оси?
9. Каков закон распределения фазы при смещениях облучателя поперек оптической оси?

10. Чем обусловлен уровень боковых лепестков зеркальной антенны и как можно его уменьшить?

11. Какова зависимость КИП от отношения $\frac{D/2}{f}$ (при неизменной ДН облучателя)?

12. Как можно управлять ДН зеркальной антенны?

13. Как влияет наличие реакции зеркала на технические характеристики облучателя?

14. Каковы основные способы устранения реакции зеркала на облучатель?

15. Как влияет на ДН точность изготовления зеркала?

16. Назовите разновидности зеркальных антенн.

17. Как методом сравнения можно измерить коэффициент усиления?

18. Что такое электромеханическое сканирование?

Список рекомендованной литературы:

1. Велигоша А.В. Лабораторный практикум по дисциплине «Антенно-фидерные устройства», стр. 103 – 120.

2. Велигоша А.В. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студента по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».

3. Техническое описание лабораторного стенда по исследованию антенн.

Практическая работа 9.

Моделирование и исследование антенн с бегущей волной тока.

Цель работы:

1. Ознакомление с теоретическими основами и принципом работы спиральной антенны.
2. Формирование умений по расчету и построению диаграмм направленности (ДН) и определению основных параметров направленного действия спиральных антенн с использованием специального программного обеспечения.
3. Формирование навыка измерения ДН спиральных антенн.

Учебные вопросы:

1. Устройство и принцип работы спиральных антенн.
2. Измерение ДН спиральной антенны.

1. Устройство и принцип работы спиральных антенн.

Среди различных типов широкополосных антенн важное место занимают разнообразные спиральные антенны. Они являются слабо и средне направленными широкополосными антеннами эллиптической и управляемой поляризации. Применяются в качестве самостоятельных антенн, облучателей зеркальных и линзовых антенн, возбуждателей волноводно-рупорных антенн электрической и управляемой поляризации, элементов антенных решеток.

Спиральные антенны - это антенны поверхностных волн. По виду направителя (замедляющей системы) и способу обеспечения работы в широком диапазоне частот их можно разделить на:

- цилиндрические регулярные, у которых геометрические параметры постоянны по всей длине и широкополосность обусловлена наличием дисперсии фазовой скорости (рисунок 1 типы спиральных антенн, а);
- эквиугольные или частотно-независимые (конические рисунок 1 типы спиральных антенн, б и плоские рисунок 1 типы спиральных антенн, в);
- нерегулярные, к которым относятся все другие типы спиральных антенн: конические с постоянным шагом намотки (рисунок 1 типы спиральных антенн, г), плоская (архимедова рисунок 1 типы спиральных антенн, д) и другие.

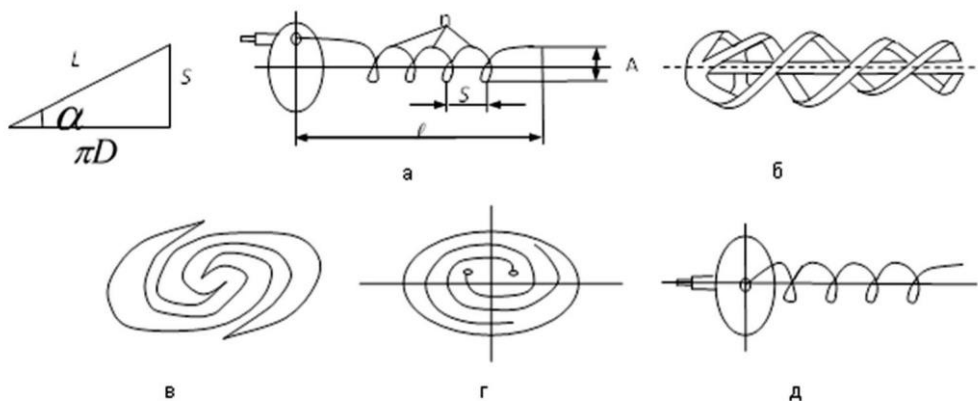


Рисунок 1. Типы спиральных антенн

Спиральная антенна представляет собой провод, один конец которого обычно остается свободным, а второй присоединяется к внутреннему проводу коаксиального кабеля. Внешний провод присоединяется к плоскому металлическому или решетчатому экрану (диску), который препятствует проникновению тока, текущего по внутренней поверхности оплетки коаксиального кабеля, на ее наружную поверхность, а также роль рефлектора, уменьшая излучение антенны в заднее полупространство.

Направленные свойства спиральной антенны зависят от ее поперечных размеров. Если диаметр витка мал по сравнению с длиной волны, то каждый виток можно считать элементарной плоской рамкой. Тогда, спиральную антенну можно рассматривать как совокупность элементарных электрических диполей, оси которых совпадают с осью

антенны. В этом случае антенна интенсивно излучает в плоскости витка, то есть перпендикулярно оси антенны. ДН имеет вид, изображенный на рисунке 2. Виды диаграммы направленности спиральной антенны при различных диапазонах волн. Режим работы антенны называется режимом ненаправленного излучения ($\pi D \ll \lambda$) рисунок 2. а.

Если $\pi D \approx \lambda$, то при определенных значениях шагового угла излучение является однонаправленным с максимумом в направлении вдоль оси (рисунок 2 Виды диаграммы направленности спиральной антенны при различных диапазонах волн. б). Такой режим работы называется режимом осевого излучения. При увеличении диаметра витков спирали излучение в направлении оси прекращается, появляются два направления максимального излучения (рисунок 2 Виды диаграммы направленности спиральной антенны при различных диапазонах волн, в). Пространственная ДН принимает вид конуса. Такой режим называется режимом конического излучения.

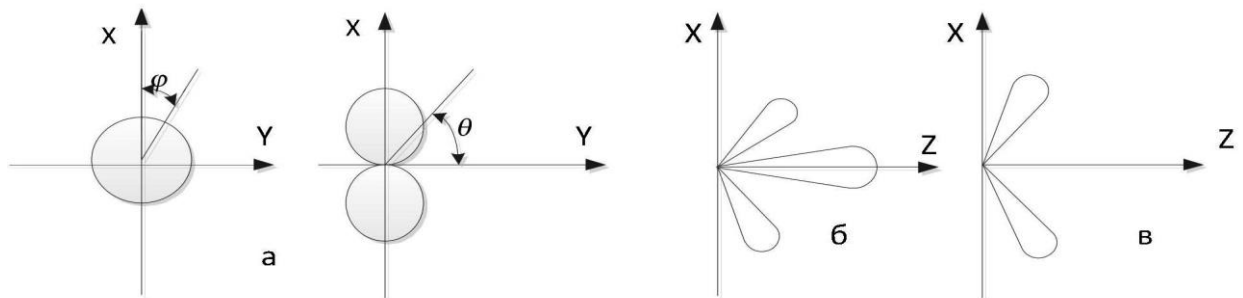


Рисунок 2. Виды диаграммы направленности спиральной антенны при различных диапазонах волн

Характерными особенностями режима осевого излучения, в котором спиральные антенны наиболее часто используются, являются:

- направление максимального излучения совпадает с осью антенны;
- ток в антенне изменяется по закону бегущей волны;
- излучаемое антенной электромагнитное поле имеет круговую (или близкую к ней) поляризацию в направлении оси антенны, а в других направлениях - эллиптическую;
- входное сопротивление антенны почти чисто активное;
- антенна имеет хорошие диапазонные свойства (ширина полосы пропускания « $\pm 30\%$ »).

Теоретические исследования показывают, что в спирали с длиной витка, равной примерно λ , практически имеет место один тип бегущей волны с замедленной фазовой скоростью, определяющей режим осевого излучения.

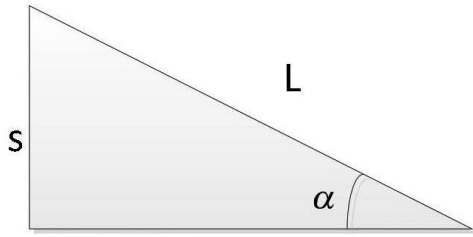
На основании экспериментальных данных получены эмпирические формулы для расчета параметров спиральной антенны.

Если $\alpha = 2^\circ \div 15^\circ, 2 \leq n \leq 20$, ширину луча по половинной мощности можно рассчитать по формуле:

$$2\theta_{0,5} = \frac{52^\circ \lambda}{L \sqrt{\frac{nS}{\lambda}}} \quad (1)$$

где S- шаг спирали; n – число витков; L - длина одного витка.

Причем, $S = L \sin \alpha$, где α - угол подъема в витке спирали. Если развернуть один виток спирали так, чтобы представить его в качестве гипотенузы некоего прямоугольного треугольника с катетом S, то угол подъема в витке спирали α - это противолежащий катету S угол в этом треугольнике.



КНД в направлении оси спирали:

$$D = 15 \left(\frac{L}{\lambda} \right)^2 \frac{nS}{\lambda}. \quad (2)$$

Входное сопротивление:

$$R_{ex} = 140 \frac{L}{\lambda}. \quad (3)$$

Характеристика направленности спиральных антенн в плоскости, проходящей через ось антенны, для составляющих E_φ и E_θ , как и для любой сложной антенны, состоит из двух множителей: характеристики направленности одного элемента антенны, которым можно считать плоский виток и множителя системы, состоящего из ненаправленных излучателей, возбуждаемых бегущей волной тока. Определяющим является множитель системы. Поэтому, можно считать ДН одинаковыми для обеих составляющих спиральной антенны, и расчет вести на основании формул, справедливых для антенны бегущей волны, состоящей из дискретных ненаправленных излучателей.

$$F(\theta) = \frac{\sin \left[\frac{\pi S n}{\lambda} \left(\frac{1}{1 - \frac{\lambda S}{1,22 L^2}} - \cos \theta \right) \right]}{n \sin \left[\frac{\pi S}{\lambda} \left(\frac{1}{1 - \frac{\lambda S}{1,22 L^2}} - \cos \theta \right) \right]} \quad (4)$$

где θ - угол между осью антенны и направлением на точку наблюдения.

Характеристики направленности и круговая поляризация сохраняются в довольно широком диапазоне волн - примерно от $(0,7 \div 0,8) \lambda_0$ до $1,4 \lambda_0$, где λ_0 - длина волны, для которой подобраны оптимальные соотношения между $L, \frac{c}{V_\phi}, n, S$. При изменении λ

изменяется также V_ϕ (при укорочении λ отношение $\frac{c}{V_\phi}$ уменьшается) электрическая длина витка изменяется незначительно и равенства (2), (3) мало нарушаются.

Конические спиральные антенны обладают лучшими диапазонными свойствами по сравнению с круглыми цилиндрическими антеннами. Ширина полосы такой антенны может быть двух и трехкратной.

Для улучшения направленных свойств спиральные антенны соединяются в решетки. В данной работе изучается работа спиральной антенны во всех трех режимах излучения.

Расчетное задание

1. Рассчитать вручную оптимальную длину спиральной антенны и коэффициент направленного действия (КНД) по следующим формулам:

$$L_{\text{онм.}} = \frac{\left(\lambda + S + \frac{\lambda}{2\pi} \right)}{\xi}, D = 15 \left(\frac{L}{\lambda} \right)^2 \cdot n \frac{S}{\lambda}, \quad S = L \sin \alpha$$

где S – шаг спирали; n – число витков; L – длина одного витка; $\xi = 1,22$ - коэффициент замедления.

2. Рассчитать и построить в декартовой системе координат нормированную ДН спиральной антенны по формуле (4).

3. Данные для расчета берутся из табл. 1 в соответствии с вариантом, номер которого соответствует порядковому номеру фамилии студента в журнале.

Таблица 1

Вариант				1	2	3	4	5	6	7	8
Длина волны λ , м		λ		0,03	0,05	0,1	0,15	0,2	0,22	0,25	0,37
Число витков n		n		3	4	6	8	10	14	16	14
Угол подъема α , градус		α		10	10	12	5	5	8	8	8
9	10	11		12	13	14	15	16	17	18	19
λ	1,5	1,4	0,7	1,55	0,2	1,7	0,5	0,9	0,65	1,9	1,6
n	5	5	4	6	17	10	11	13	12	7	6
α	14	14	12	12	11	11	9	9	9	5	5

ДН рассчитывается следующим образом. Определяется угол $2\theta_{0,5}$ по формуле (1).

Затем, рассчитываются точки ДН, начиная с $\theta = 0^\circ$, с шагом $\frac{2\theta_{0,5}}{4}$ до конца первого

бокового лепестка. Строится график $f(\theta)$, определяются значения $2\theta_0, 2\theta_{0,5}$ (уточненные по построенному графику) и уровень первого бокового лепестка в децибелах. Занести полученные результаты в табл. 2.

Вариант номер	λ	n	α	$2\theta_{0,5}$, градус	$2\theta_0$, градус	уровень первого бокового лепестка, д.ед./дБ	$L_{\text{онм}}$	D

1. Для упрощения расчетов, в лабораторном практикуме предлагается возможность компьютерного расчета. На панели управления щелкните по иконке (1), после чего запустите симуляционную функцию **Helix**, щелкнув по иконке (2). Откроется лицевая панель симуляционной функции **Helix**.

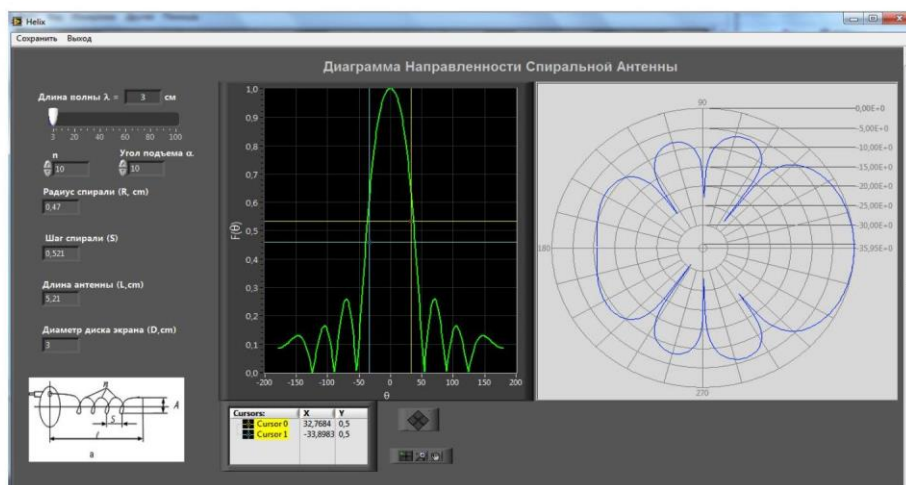
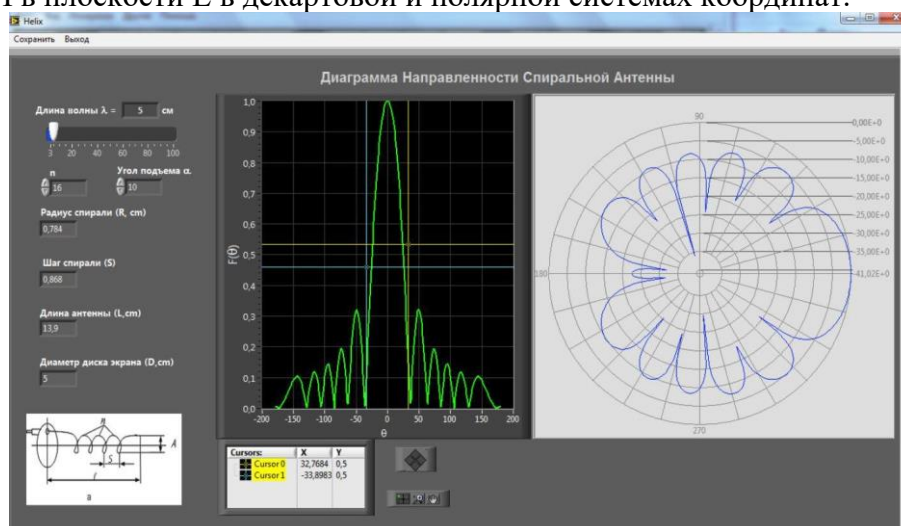


Рисунок 3. Лицевая панель программы

2. Данные для расчета берутся из табл. 1 в соответствии с вариантом. Данные вводить в лицевую панель программы, рисунок 3. После чего, на графике появится нормированная ДН в плоскости Е в декартовой и полярной системах координат.



Определить для полученной нормированной ДН ширину ее основного лепестка - угловой сектор $2\theta_{0,5}$. Определить также уровень первого бокового лепестка в относительных единицах и в децибелах. При необходимости, воспользоваться разъяснениями в разделе 9.2 технического описания лабораторной установки «Определение углового сектора $2\theta_{0,5}(\varphi_{0,5})$ и уровня первого бокового лепестка диаграммы направленности, стр. 26» или учебным материалом лабораторной работы 1.

3. Результаты внести в табл. 3.

Таблица 3

вариант номер	λ	n	α	$2\theta_{0,5}$, градус	Уровень первого бокового лепестка, отн.ед./дБ

4. В табл. 4 необходимо записать результаты расчета нормированной ДН спиральной антенны при $\lambda = 14,3\text{см}$, $n = 15$, $\alpha = 4^\circ$, которая используется в данном лабораторном

практикуме в качестве испытуемой. В качестве исходных данных для расчета использовать указанные в табл. 4 значения.

Таблица 4

пытуемая генна	λ	n	α	$2\theta_{0,5}$, градус	Уровень первого бокового лепестка, отн.ед./дБ
иральная генна N1	14.3 см	15	4°		

5. Запомнить результаты всех расчетов и рисунки ДН для варианта с данными, указанными в табл. 4.

2. Измерение ДН спиральной антенны

1. Установить вспомогательную вибраторную антенну с согласующим устройством U- колено (11) (см. 4.1 *Оборудование стенда*, стр. 6) на треногу для вспомогательной антенны (см. раздел 6.2 Сборка стенда, стр. 12). Размер плеч вибратора - 10 см.

2. Подсоединить ее к выходу RF OUT генератора N1 PX1e-5673E (см. раздел 6.3 Сборка контрольно-измерительного оборудования, стр.13). Использовать коаксиальный кабель (14) (см. 4.1 *Оборудование стенда*, стр. 6). Вспомогательная антенна должна быть в вертикальном положении.



3. Установить спиральную антенну (8) (см. 4.1 *Оборудование стенда*, стр. 6) на опорно- поворотное устройство для испытуемой антенны (6.2 Сборка стенда, стр. 12) На первом этапе измерений исследуется осевой режим излучения спиральной антенны.

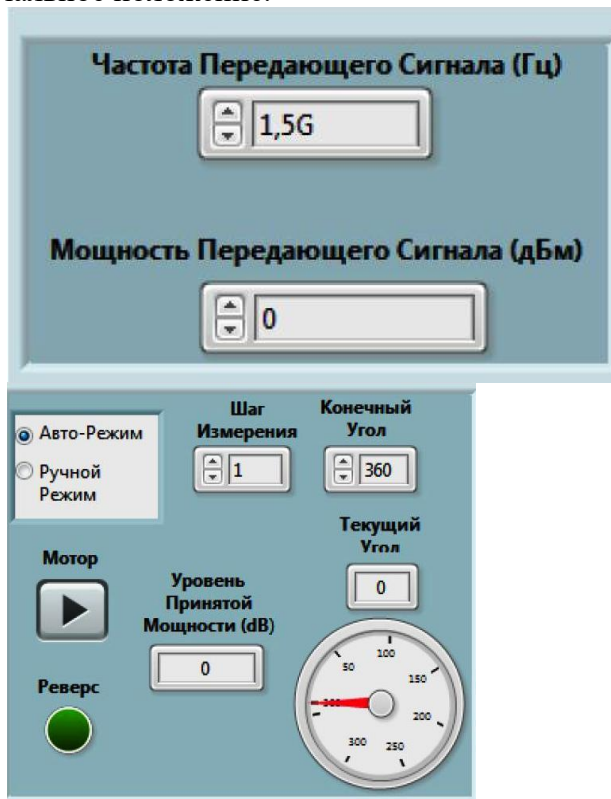


4. Подсоединить ее к входу RF IN анализатора N1 PX1e-5663E. Использовать коаксиальный кабель (15) (см. 4.1. *Оборудование стенда*, стр. 6). Испытуемая антенна должна быть в горизонтальном положении.

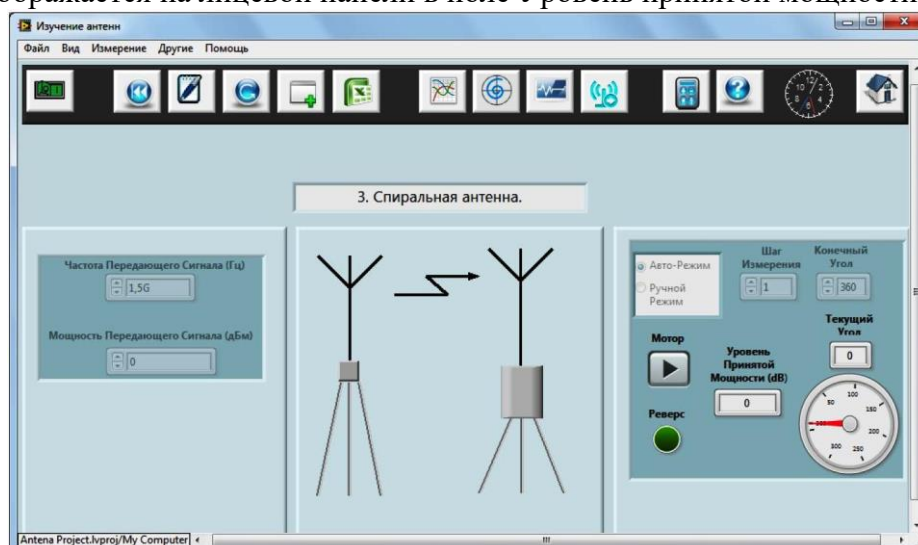
5. Разнести испытуемую и вспомогательную антенны на расстояние $r = 2$ м, причем ориентировать антенны так, чтобы они были направлены друг на друга соосно. Важно также, чтобы точки подключения к фидерам испытуемой и вспомогательной антенн находились на одинаковой высоте.

6. На лицевой панели в поле *Частота Передающего Сигнала* ввести $f = 1,5$ ГГц а в поле *Мощность Передающего Сигнала* – 0 дБм.

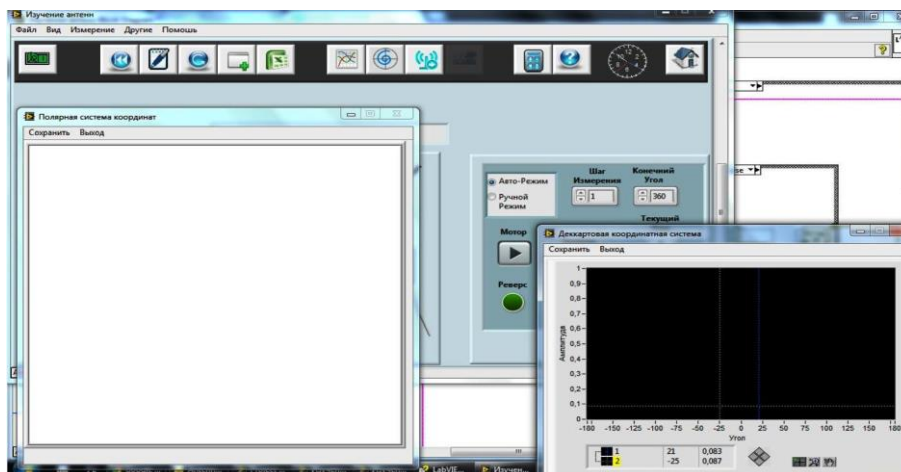
В поле *Шаг измерения* ввести необходимое значение (по умолчанию 1), соответствующее шагу измерения, в градусах, а в поле *Конечный Угол* ввести значение (по умолчанию 360) соответствующее конечному положению антенны. При достижении антенной конечного угла автоматически включается реверс, и антенна возвращается в начальное положение.



7. Запустить генератор и анализатор кнопкой *Старт* на лицевой панели. Генерируемый сигнал, через выход RF OUT генератора N1 PX1e-5673E, будет излучаться вспомогательной антенной, а испытуемая антенна будет принимать этот сигнал. Через вход RF IN анализатора N1 PX1e-5663E измеряется уровень мощности, и значение в децибелах отображается на лицевой панели в поле *Уровень принятой мощности*.



8. На панели управления открыть поля декартовой и полярной системы координат, нажав кнопки   удобно разместить эти окна на экране так, чтобы не заслонять кнопку *Мотор*.



9. Проверить расположение двух антенн по пункту 5. Запустить движение опорно-поворотного устройства нажатием кнопки **Мотор** на лицевой панели. Антенна начнёт вращаться от 0° до значения, определяемого параметром *Конечный угол* и, соответственно зафиксированному в окне на лицевой панели шагу измерения (Шаг измерения), измеряются уровень принятой мощности в децибелах, нормированные результаты измерения графически записываются параллельно в двух окнах систем координат и в отдельный шаблонный файл в формате MS Excel. Достигнув значения, определяемого параметром *Конечный угол*, ОПУ начинает реверсное вращение, в процессе которого снова измеряются значения мощности поля излучения. Кривые, полученные во время реверсного вращения, записываются в тех же графических окнах, что и при первом витке вращения испытуемой антенны (в декартовой системе координат-другим цветом).

Для обеспечения достоверности результатов, пункт 9 повторить. В начале каждого следующего измерения необходимо нажимать кнопку **Новый сеанс**  на панели управления.

10. Сохранить измеренные графики четырех нормированных ДН в регистрационной папке студента.

11. Экспериментальные результаты автоматически перенесутся в отдельный шаблонный файл в формате MS Excel в виде двух таблиц, чередующих друг друга.

12. Открыть *Excel*, нажимая кнопку шаблон Excel  на панели управления

N	Угол (град.)	Амплитуда (dB)
0	0	-29,917
1	0	-29,983
2	1	-30,163
3	2	-30,209
4	3	-30,001
5	4	-30,336
6	5	-30,577
7	6	-30,5
8	7	-30,698
9	8	-30,75
10	9	-31,18
11	10	-31,39
12	11	-31,745
13	12	-32,226
14	13	-32,404

13. Обязательно сохранить полученные табличные данные измерений в плоскости E13.

14. Подготовиться к измерениям ДН испытуемой спиральной антенны (8) (см. 4.1 *Оборудование стенда*, стр. 6) в режиме осевого излучения в плоскости H , повернув вспомогательную вибраторную антенну на 90° по отношению к вертикали.



15. Повторить вышеуказанные п.п. 3-12.

16. Обязательно сохранить полученные табличные данные измерений в плоскости H .

Обработка результатов измерений

1. Просчитать усредненные результаты измерений ДН в обеих плоскостях, зафиксированных шаблонном файле формата *Excel*. Записать полученные значения в том же файле, заполнить табл. 5 и табл. 6. Рекомендуется внимательно проследить при заполнении таблиц значения функций и аргумента φ (при реверсном повороте углы изменяются убывающем порядке).

Таблица 5

θ	$f_{E1}(\theta)$	$f_{E2}(\theta)$	$f_{E3}(\theta)$	$f_{E4}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{E1}(\theta)$	$f_{E2}(\theta)$	$f_{E3}(\theta)$	$f_{E4}(\theta)$	σ
						$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	$f_{Ecp}(\theta)$	

Таблица 6

φ	$f_{H1}(\theta)$	$f_{H2}(\theta)$	$f_{H3}(\theta)$	$f_{H4}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{H1}(\theta)$	$f_{H2}(\theta)$	$f_{H3}(\theta)$	$f_{H4}(\theta)$	σ
						$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	$f_{Hcp}(\theta)$	

2. Определить погрешность результатов измерений в обеих плоскостях по формуле

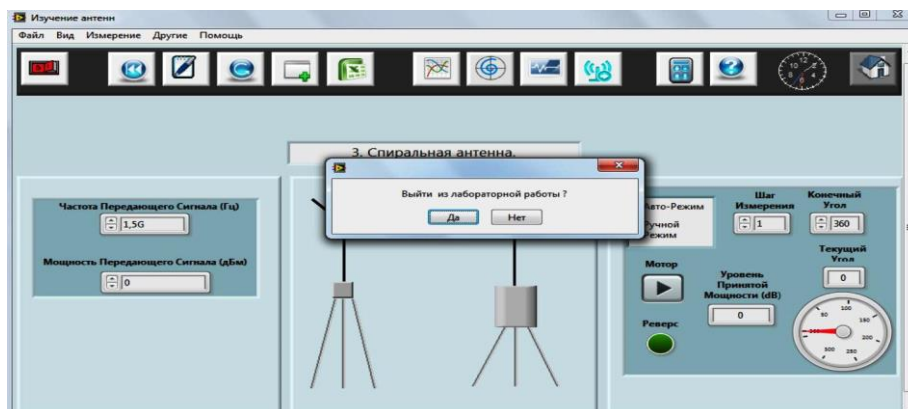
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{cp})^2}. \text{ Оценить точность измерений.}$$

3. Построить ДН спиральной антенны в обеих плоскостях по усредненным значениям функций (см. табл. 5 и табл. 6).

4. Сравнить усредненные результаты измерений спиральной антенны в плоскости E с расчетными результатами, записанными в табл. 4.

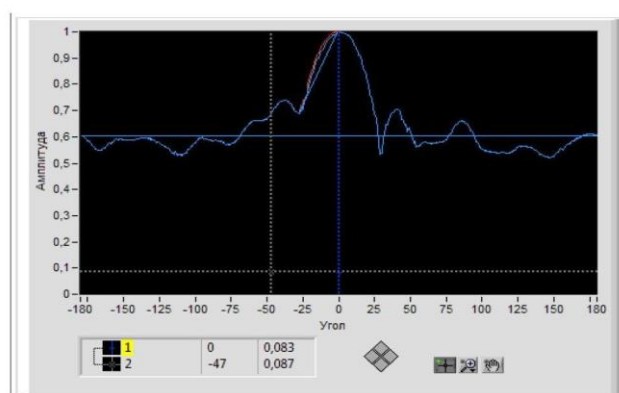
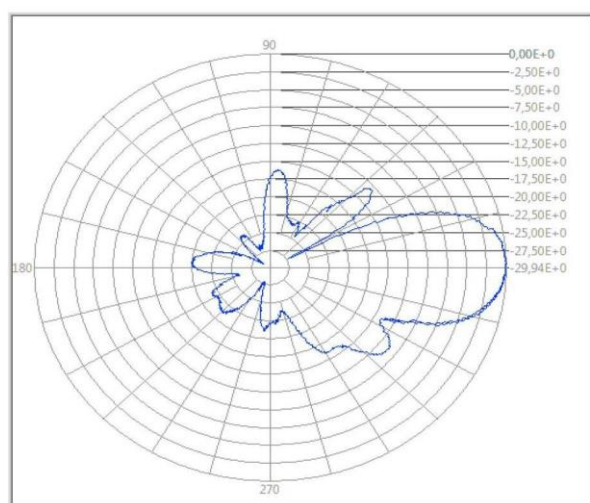
5. Нажать кнопку **Стоп**.

6. Закончить данную лабораторную работу, **Файл>Выход**.

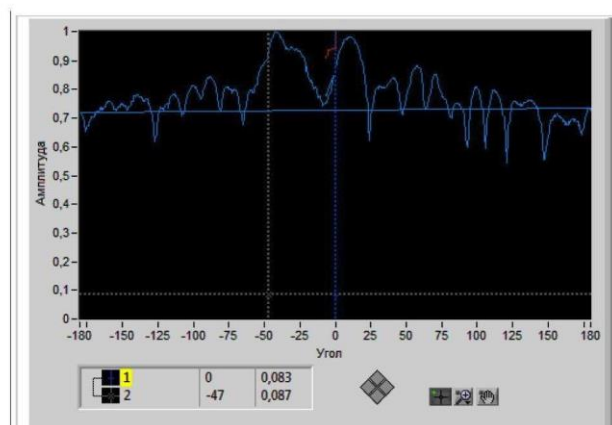
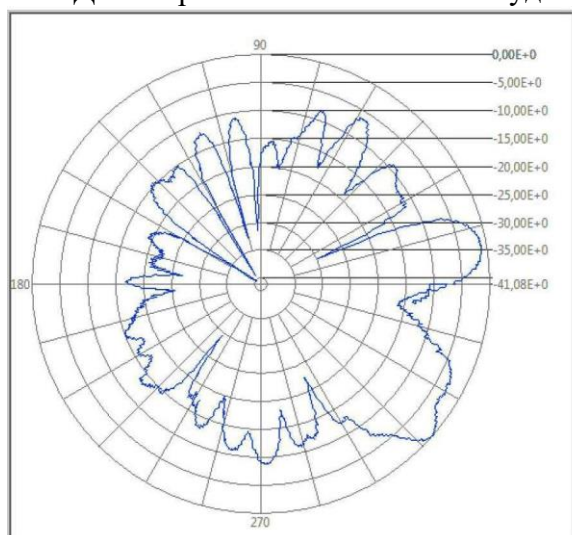


После выполнения опыта в режиме направленного излучения:

1. ДН в горизонтальной плоскости будет иметь примерно следующий вид:



2. ДН в вертикальной плоскости будет иметь примерно следующий вид:



Оборудование и материалы

1. Учебный класс с лабораторным стендом по исследованию антенн.

Указания по технике безопасности

1. К проведению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие требуемые инструктажи по охране труда.

2. Включение лабораторных установок (компьютеров) осуществляется только с разрешения преподавателя.

3. При проведении лабораторной работы не допускается использование приборов, оборудования, не предусмотренного планом проведения занятия.

4. Не разрешается при включенном оборудовании переключать кабели питания, соединительные кабели блоков и компонентов лабораторных установок (компьютеров).

5. При возникновении аварийных ситуаций необходимо немедленно отключить оборудование от питающей сети, сообщить об этом преподавателю и действовать по его указанию.

6. В аудитории запрещается пользоваться источниками открытого огня. При возгорании оборудования его необходимо немедленно обесточить, сообщить об этом преподавателю, принять меры по устранению возгорания и действовать по указанию преподавателя.

7. Стенд необходимо эксплуатировать в помещении, не подверженном воздействию факторов, повышающих опасность поражения электрическим током (повышенная влажность, отсутствие шины заземления, и т. д.).

8. Запрещается включение установки в сеть в атмосфере, содержащей горючие газы или легковоспламеняющиеся жидкости.

9. Корпус лабораторной установки должен быть заземлен. Сопротивление контура заземления не должно превышать 4 Ом. Соблюдайте общие правила техники безопасности применимые к приборам, имеющим питание от сети переменного тока.

10. При возникновении непредвиденных лабораторной работой неисправностей, а также в случае появлении запаха, свидетельствующего о возгорании электрических проводов или радиокомпонентов, следует незамедлительно прекратить работу с установкой, выключив ее из сети и обратиться к обслуживающему персоналу.

11. Для исключения возможности СВЧ облучения запрещается стоять в непосредственной близости от раскрыта передающей антенны.

12. Лабораторный стенд имеет низковольтное питание. Питание подается от модулей N1 PXI.

13. Запрещается подключать к рабочему стенду другие блоки питания или производить какие-либо внешние подключения.

14. По окончании работы с лабораторным оборудованием (компьютерами) его необходимо выключить установленным порядком.

Задание по выполнению лабораторной работы:

1. Изучить теоретический материал по учебному вопросу 1.
2. Выполнить практическое задание по учебному вопросу 2.
3. Ответить на контрольные вопросы.
4. Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета по лабораторной работе:

1. Титульный лист (образец представлен в Приложении 1).
2. Цель занятия.
3. Основные теоретические положения, изучаемого материала. Выводы по ним, подчеркивающих суть, изучаемого вопроса.
4. Перечень практических заданий. По каждому заданию представляются расчеты, обоснования (результаты исследований) и выводы по ним.
Все результаты должны быть оформлены в виде таблиц и графиков.
5. Расчетные данные (таблицы табл.2 - табл. 4) и графики ДН.
6. Результаты экспериментальных исследований и их обработку (таблицы: табл. 5, табл. 6 и графики ДН).

Примечание: Максимальное количество баллов студент получает, если оформление отчета соответствует установленным требованиям, а отчет полностью раскрывает суть лабораторной работы. Основанием для снижения оценки являются:

- наличие ошибок, не искажающих сути, рассматриваемого вопроса;
- небрежный отчет.

Отчет может быть отправлен на доработку в следующих случаях:

- неправильные расчеты (ошибки допущенные при проведении исследований);

- не обоснованные (ошибочные) выводы;
- не полностью выполненная работа.

Контрольные вопросы:

1. Как выглядит условие получения максимума КНД в главном направлении излучения для спиральной антенны?
2. Почему и при каких условиях спиральная антенна создает вдоль своей оси поле круговой поляризации?
3. Охарактеризуйте режимы работы спиральной антенны.
4. Где применяются антенны с вращающейся поляризацией?
5. Чем объясняются поляризационные свойства спиральной антенны?
6. Каков закон распределения фаз поля вдоль оси антенн бегущей волны?

Список рекомендованной литературы:

1. Велигоша А.В. Лабораторный практикум по дисциплине «Антенно-фидерные устройства», стр. 69 – 85.
2. Велигоша А.В. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студента по дисциплине «Антенно-фидерные устройства».
3. Техническое описание лабораторного стенда по исследованию антенн.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению курсовой работы
по дисциплине «Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн»
для студентов направления подготовки
11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
Направленность (профиль)
«Технологии построения программно-управляемых систем и компьютерных сетей»

Ставрополь
2026

Введение

Курсовая работа по дисциплине «Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн» обеспечивают формирование у обучающихся набора профессиональных компетенций, которые обеспечивают их профессиональную деятельность в области эксплуатации антенно-фидерных устройств различных типов.

Объект исследования – заданная антенна.

Предмет исследования – моделирование и исследование заданной антенны.

Цель работы – (или оптимизация) электрических характеристик заданной антенны путем решения внутренней и внешней задач.

Примерные темы курсовых работ

№ п/п	Темы курсовых работ	Ф.И.О. студента
1.	Моделирование и исследование двойной ромбической горизонтальной антенны	
2.	Моделирование и исследование лямбда-образной антенны	
3.	Моделирование и исследование вибраторной горизонтальной диапазонной антенны	
4.	Моделирование и исследование двойной однопроводной антенны с бегущей волной тока	
5.	Исследование влияния окружающей среды на распространение радиоволн	
6.	Моделирование и исследование вертикальной полуромбической антенны	
7.	Моделирование и исследование ромбической горизонтальной антенны	
8.	Моделирование и исследование логопериодической антенны КВ диапазона	
9.	Моделирование и исследование антенны бегущей волны с собирательной линией	
10.	Моделирование и исследование согнутой ромбической горизонтальной антенны	
11.	Моделирование и исследование V-образной антенны	
12.	Моделирование и исследование однопроводной антенны с бегущей волной тока	
13.	Моделирование и исследование щелевой антенны	
14.	Моделирование и исследование зигзагообразной антенны	
15.	Моделирование и исследование антенны волновой канал	
16.	Моделирование и исследование логопериодической антенны УКВ диапазона	
17.	Моделирование и исследование спиральной антенны	
18.	Моделирование и исследование самодополнительной антенны	

19.	Моделирование и исследование петлевой рамочной антенны (метрового диапазона волн)	
20.	Моделирование и исследование антенной решетки из симметричных вибраторов	
21.	Моделирование и исследование петлевой рамочной антенны (дециметрового диапазона волн)	

Структурно курсовая работа должна содержать:

- титульный лист;
- задание на курсовую работу;
- содержание;
- введение;
- теоретическую (аналитическую) часть, в которую входит раздел 1;
- практическую (эмпирическую) часть, в которую входят разделы 2 и 3;
- заключение;
- список использованной литературы;
- Приложения (при необходимости).

В каждом разделе рекомендуется выделять по 3 – 4 подраздела, в том числе подраздел – «Выводы по разделу».

Объем курсовой работы должен составлять 30 – 35 листов.

Рекомендации по содержанию

В общем, введение к научной работе – это предварительное краткое сообщение научного характера о проделанной работе, имеющее своей целью ввести читателя в курс излагаемого материала.

Итак, во введении должен раскрываться основной замысел курсовой работы. На введение рекомендуется отвести 2 – 3 страницы отчета. Исходя из этого, во введении должно быть представлено:

- обоснование актуальности работы;
- формулировка объекта исследования, т.е. определение какая антенна анализируется и исследуется;
- указание методики исследования и обоснование ее выбора;
- формулировка предмета исследования, т.е. определение что производится с объектом исследования (антенной);
- формулировка цели работы, т.е. для чего это делается;
- определение задач, решаемых для достижения цели;
- краткое представление самой работы и ее глав (разделов), т.е. что выполнено, разработано, проведено, рассчитано или достигнуто.

Для обоснования актуальности работы необходимо увязать исследуемый объект, приведенный в теме курсовой работы, с конкретной проблемой передачи информации по радиоканалу или по-другому сформулировать, чем интересен выбранный объект исследования с точки зрения АФУ и РРВ или передачи информации по радиоканалу.

Формулировка объекта исследования предназначена для конкретизации и ограничения объема исследования конкретным объектом, который является носителем проблемы, на которую направлена исследовательская деятельность.

Следующим шагом является **выбор метода или методики исследования**. Для этого на основе анализа изученной литературы указываются известные методики анализа АФУ

путем решения внутренней и внешней задач с кратким изложением их достоинств и недостатков, а затем производится обоснование выбора метода моделирования, т.е. указывается для чего необходимо решать задачу моделирования объекта исследования.

Данный шаг еще больше сужает решаемую проблемную ситуацию и позволяет сформулировать **предмет исследования**, т.е. то, что нужно сделать с объектом исследования. Следовательно, предмет исследования является конкретной частью объекта. Кроме того, следует кратко обосновать, какое производилось моделирование, например математическое или схемотехническое.

Цель курсовой работы, как исследовательской работы студента, представляет собой решение выдвинутой проблемы, или отвечает на вопрос, обозначенный в актуальности работы.

Не следует формулировать цель в виде информационного процесса. Такое предложение как «Изучение характеристик АФУ, влияющих на передачу информации» будет ошибочным.

Цель нужно формулировать как результат, например: «Определить (или оптимизировать) электрические характеристики заданной антенны путем решения внутренней и внешней задач».

Для достижения поставленной в курсовой работе цели необходимо решить **частные задачи исследования**. Задачи курсовой работы должны быть взаимосвязаны друг с другом, располагаться последовательно всему изложению, соответствовать основному содержанию работы. В данной курсовой работе целесообразно решить три частные задачи:

- 1) Провести теоретическое описание заданной антенны.
- 2) Моделирование заданной антенны.
- 3) Провести исследование (исследование и оптимизацию) электрических характеристик заданной антенны.

Краткое представление работы. Курсовая работа состоит из введения, трех разделов и заключения. Работа изложена на __ страницах, содержит __ таблиц, __ иллюстраций в виде рисунков, схем и графиков. При написании курсовой работы было рассмотрено __ источников информации (не менее 10).

Обобщенный пример кратких характеристик разделов работы представлен ниже.

В первом разделе проведен анализ На основе проведенного анализа установлена характеристика, влияющая на качество радиосвязи, выполнена математическая постановка задачи моделирования объекта исследования, произведено обоснование вида разрабатываемой модели и выбор компьютерной среды для моделирования.

Во втором разделе выполнено моделирование При этом разработана такая-то модель объекта исследования в такой-то среде моделирования.

В третьем разделе произведено исследование разработанной модели с учетом обоснованных исходных данных (или начальных условий), а также произведена количественная (или качественная) оценка характеристики, влияющей на качество радиосвязи. Для подтверждения адекватности разработанной модели выполнено сравнение результатов моделирования с литературными теоретическими данными или известными результатами.

В заключение сделаны выводы о том, как исследуемый объект влияет на качество радиосвязи.

Теоретическая часть должна содержать вербальное, графическое и математическое описание объекта исследования на основе обзора научной, научно-информационной, справочной литературы. Представленный материал должен быть логически связан с целью исследования. В разделах или подразделах теоретической части необходимо отражать отдельные компоненты решаемой проблемы и завершать их выводами.

Эмпирическая (практическая) часть включает обоснование и разработку модели, описание системы и методов экспериментального исследования, анализ результатов

экспериментального исследования, схемы, графические и математические способы интерпретации полученных данных, сформулированные выводы.

В заключении подводятся итоги проделанной исследовательской работы студента. На заключение рекомендуется отвести 2 страницы отчета.

В заключении должно быть представлено:

- перечисление основных наиболее важных результатов работы;
- определение степени достижения цели работы;
- достоинства и недостатки работы;
- теоретическая значимость работы;
- практическая ценность работы;
- направления дальнейших исследований по теме работы.

Перечисление основных наиболее важных результатов работы. Это по сути «компиляция» выводов по параграфам и разделам курсовой работы. При этом вне которых случаях допускается «простое копирование» выводов в заключение без каких-либо переформулировок, то есть заключением становится объединенный массив выводов. Однако более правильным считается применение отличительных формулировок выводов, которые представляют собой обобщенные выводы, объединяющие в себе выводы частных локальных выводов. Как показывает практически опыт, отличные формулировки выводов в заключении совпадают с формулировками текста выводов по разделам не более чем на 50%.

Определение степени достижения цели работы. Необходимо сделать заключение, достигла ли работа своей цели. Для этого необходимо сравнить результаты работы с поставленной целью и сделать вывод. Если работа не в полной мере достигла своей цели, то необходимо указать объективные причины.

Достоинства и недостатки работы. Это собственная оценка студентом своей научно-исследовательской деятельности в рамках курсовой работы.

Теоретическая значимость работы. Как правило, состоит в формировании профессиональных компетенций, необходимых выпускнику. При этом следует указать, какие конкретно компетенции были сформированы в полном объеме или частично в результате выполнения курсовой работы.

Практическая ценность работы. Практическая ценность курсовой работы заключаются в возможности ее применения для решения прикладных практических задач в профессиональной или учебной деятельности. При этом следует указать конкретные задачи.

Направления дальнейших исследований по теме работы. В этом абзаце на основе перечисленных недостатков следует указать, каким образом результаты работа могут быть улучшены (дополнены), либо предложены пути совершенствования.

Список использованной литературы (источников) должен содержать перечень всех используемых автором нормативных документов, монографий, учебных и учебно-методических пособий, статей и интернет-источников. Объем списка должен содержать 10 – 15 наименований, а срок давности публикации не должен превышать 5 – 10 лет.

Приложение содержит весь фактический материал экспериментальных исследований (громоздкие схемы, объемные расчетные материалы, подробные вывод математических выражений, большие алгоритмы, листинги программ, поясняющие рисунки с осциллограммами и спектрограммами и т.п.).

Образец оформления задания на курсовую работу

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора департамента ЦРСиЭ

И.В. Азаров

«___» сентября 2026 г.

Институт	Перспективной инженерии, канд. техн. наук, доцент
Направление подготовки	11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи
Профиль подготовки	Технологии построения программно-управляемых систем и компьютерных сетей

ЗАДАНИЕ на курсовую работу

студента Мирошниченко Александра Юрьевича

по дисциплине Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн

1. Тема работы: Моделирование и исследование **заданной антенны**.

2. Цель: определение (или оптимизация) электрических характеристик заданной антенны путем решения внутренней и внешней задач.

3. Задачи:

- 1) Провести теоретическое описание **заданной антенны**.
- 2) Моделирование **заданной антенны**.
- 3) Провести исследование (исследование и оптимизацию) электрических характеристик **заданной антенны**.

4. Перечень подлежащих разработке вопросов:

а) по теоретической части:

- 1.1 Анализ теоретических основ построения **заданной антенны**.
- 1.2 Анализ электрических характеристик **заданной антенны**.
- 1.3 Постановка задачи моделирования.

б) по практической части:

- 2.1 Обоснование вида разрабатываемой модели и выбор компьютерной среды моделирования.
- 2.2 Обоснование начальных условий (исходных данных) для моделирования.
- 2.3 Разработка модели заданной антенны в программном продукте MMANA.
- 3.1 Проведение исследований (экспериментов) с разработанной моделью.
- 3.2 Оптимизация электрических характеристик **заданной антенны**.
- 3.3. Анализ результатов моделирования и исследований.
- 3.4. Разработка рекомендаций по применению разработанной модели в профессиональной деятельности или в учебном процессе.

5. Исходные данные:

а) по литературным источникам:

- использовать приведенное в рекомендуемых источниках вербальное, графическое и математическое описание **заданной антенны**;
- использовать известные в науке результаты исследований для сравнительной оценки полученных результатов и подтверждения адекватности разработанной модели.

б) по вариантам, разработанным преподавателем:

- самостоятельно с учетом степени подготовленности выбрать компьютерную среду для моделирования;

- использовать известные из учебного курса методические рекомендации для исследования объектов моделирования.

6. Список рекомендуемой литературы:

1. Велигоша А.В. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства: Курс лекций. - Ставрополь : СКФУ, 2016. - 471 с.
2. Жуков В.М. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства систем радиосвязи. - Тамбов: Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. - 81 с.
3. Пониматкин В.Е. Антенно-фидерные устройства систем связи: Учебное пособие. - Калининград: Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, 2010. - 122 с.
4. Гончаренко И. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA. – М.: ИП РадиоСофт, Журнал «Радио». 2012 – 80 с.
5. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=277944> - Жуков В.М. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства систем радиосвязи: учебное пособие.
6. <http://nashaucheba.ru/v18132> - учебник Ерохин Г.А., Чернышов О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский В.Г. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн;
7. <http://nashaucheba.ru/v19003> - учебник Дружин Г.И. Антенны и распространение радиоволн. Часть 2. Распространение радиоволн
8. <http://nashaucheba.ru/v26418> - учебник Голобов Д.Б., Кирильчук В.Б. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства.
9. <http://nashaucheba.ru/v42834> - учебник Нефедов Е.И. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн.
10. <http://www.ozon.ru/context/detail/id/5824158/>. Сомов А.М., Старостин В.В. Антенно-фидерные устройства.

7. Контрольные сроки представления отдельных разделов курсовой работы:

- 25 % - Первый раздел «12» октября 2026 г.
50 % - Второй раздел «23» ноября 2026 г.
75 % - Третий раздел «14» декабря 2026 г.
100 % - Оформленная работа, прошедшая нормоконтроль «18» декабря 2026 г.

8. Срок защиты студентом курсовой работы «__» декабря 2026 г.

Дата выдачи задания «28» сентября 2026 г.

Руководитель курсовой работы
кандидат технических наук, доцент

Д.Г. Гончаров

Задание принял(а) к исполнению студент(ка) очной формы обучения

1 курса ИТС-м-о-26-1(2) группы _____

А.Ю. Мирошниченко

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для обучающихся по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине «Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн»
для студентов направления подготовки
11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
Направленность (профиль)
«Технологии построения программно-управляемых систем и компьютерных сетей»

Ставрополь
2026

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЦИПЛИНЫ

1. Цель и задачи освоения дисциплины (модуля)

Цель освоения дисциплины: формирование у студентов профессиональных компетенций в области антенно-фидерных устройств и распространения радиоволн.

Задачи освоения дисциплины:

- 1) Систематизация фундаментальных знаний в принципах построения антенно-фидерных устройств и распространения радиоволн.
- 2) Формирование умений правильно использовать полученные знания для правильного выбора антенно-фидерных устройств и трасс распространения радиоволн.
- 3) Приобретение навыков в проектировании антенно-фидерных устройств;
- 4) Формирование базовой подготовки в области антенно-фидерных устройств и распространения радиоволн, необходимой для успешного освоения профессиональных дисциплин, а также для последующей проектной деятельности.

2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина «Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн» (Б1.В.04) относится к дисциплинам части, формируемой участниками образовательных отношений.

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ПК-1 Способен осуществлять эксплуатацию радиоэлектронных систем	ИД-1 _{ПК-1} Определяет методы обработки результатов измерений с использованием средств вычислительной техники	Определяет методы обработки результатов измерений с использованием средств вычислительной техники
	ИД-2 _{ПК-1} Выявляет принципы работы, устройство, технические возможности радиоизмерительного оборудования в объеме выполненных работ	Выявляет принципы работы, устройство, технические возможности радиоизмерительного оборудования в объеме выполненных работ
	ИД-3 _{ПК-1} Анализирует информацию о качестве функционирования радиоэлектронных систем по результатам их эксплуатации	Анализирует информацию о качестве функционирования радиоэлектронных систем по результатам их эксплуатации
ПК-3 Способен проводить научно-исследовательские работы по разработке	ИД-2 _{ПК-3} Применяет методы теоретических и экспериментальных исследований с использованием компьютерного моделирования, выполнения	Применяет методы теоретических и экспериментальных исследований с использованием

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
инновационных радиоэлектронных средств различного назначения	технических расчетов с применением средств вычислительной техники	компьютерного моделирования, выполнения технических расчетов с применением средств вычислительной техники
	ИД-4 _{ПК-3} Выполняет технические расчеты с применением средств вычислительной техники	Выполняет технические расчеты с применением средств вычислительной техники
	ИД-7 _{ПК-3} Применяет основы теории антенн, механизмы распространения радиоволн, принципы построения и функционирования приемной и передающей аппаратуры, аппаратно-программные средства цифровой обработки сигналов, основные принципы радиолокации и навигации, средства связи, методы помехоустойчивого кодирования	Применяет основы теории антенн, механизмы распространения радиоволн, принципы построения и функционирования приемной и передающей аппаратуры, аппаратно-программные средства цифровой обработки сигналов, основные принципы радиолокации и навигации, средства связи, методы помехоустойчивого кодирования

4. Объем учебной дисциплины (модуля) и формы контроля*

Объем занятий:	З.е.	Астр. ч.	Из них в форме практической подготовки
Всего:	5	135	
Из них аудиторных:		40,5	
Лекций		13,5	
Лабораторных работ		27	51
Практических занятий		-	
Самостоятельной работы		67,5	
Формы контроля:			
Экзамен в 1 семестре		27	
Курсовая работа (проект) в 1 семестре		27	

Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием количества часов и видов занятий

5.1. Тематический план дисциплины (модуля)

№	Раздел (тема) дисциплины	Реализуемые компетенции	Контактная работа обучающихся с преподавателем, часов				Самостоятельная работа, часов
			Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	Групповые консультации	
5 семестр							
1	Распространение радиоволн над поверхностью земли с учетом влияния реальной неоднородной атмосферы.	ПК-1 ИД-1 _{ПК-1} ИД-2 _{ПК-1} ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ИД-7 _{ПК-3}	1.50		3.00		4.50
2	Распространение тропосферных волн.	ПК-1 ИД-1 _{ПК-1} ИД-2 _{ПК-1} ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ИД-7 _{ПК-3}	1.50		3.00		4.50
3	Влияние ионосферы на распространение радиоволн. Распространение коротких волн.	ПК-1 ИД-1 _{ПК-1} ИД-2 _{ПК-1} ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ИД-7 _{ПК-3}	1.50		3.00		4.50
4	Распространение УКВ радиоволн на спутниковых радиоперелиниях.	ПК-1 ИД-1 _{ПК-1} ИД-2 _{ПК-1} ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ИД-7 _{ПК-3}	1.50		3.00		4.50
5	Параметры, характеризующие направленные и поляризационные свойства антенн.	ПК-1 ИД-1 _{ПК-1} ИД-2 _{ПК-1} ИД-3 _{ПК-1} ПК-3	1.50		3.00		4.50

		ИД-2 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ИД-7 _{ПК-3}					
6	Теоретические основы построения антенных решеток.	ПК-1 ИД-1 _{ПК-1} ИД-2 _{ПК-1} ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ИД-7 _{ПК-3}	1.50		3.00		4.50
7	Основные типы антенн УКВ диапазона.	ПК-1 ИД-1 _{ПК-1} ИД-2 _{ПК-1} ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ИД-7 _{ПК-3}	1.50		3.00		4.50
8	Антенны коротких волн. Антенны длинных и средних волн.	ПК-1 ИД-1 _{ПК-1} ИД-2 _{ПК-1} ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ИД-7 _{ПК-3}	1.50		6.00		7.50
9	Общие сведения о синтезе антенн.	ПК-1 ИД-1 _{ПК-1} ИД-2 _{ПК-1} ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ИД-7 _{ПК-3}	1.50				1.50
	Курсовой проект	ПК-1 ИД-1 _{ПК-1} ИД-2 _{ПК-1} ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ИД-7 _{ПК-3}					27
	ИТОГО за 1 семестр		13.50		27.00		67.50
	ИТОГО		13.50		27.00		67.50

2. ХАРАКТЕРИСТИКА САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Все виды самостоятельной работы по дисциплине "Антенно-фидерные устройства и

распространение радиоволн" приведены в таблице «Технологическая карта самостоятельной работы». В основу самостоятельной работы студентов по дисциплине положено конспектирование лекций и рекомендуемых источников, подготовка к компьютерному тестированию знаний, оформление и подготовка к защите отчетов по лабораторным работам, выполнению разноуровневых индивидуальных заданий в ходе лабораторных работ. По каждому виду самостоятельной работы предусмотрены определённые формы отчетности, которые студенты предъявляют преподавателю в ходе лабораторных занятий или в часы индивидуальных консультаций.

Таблица 1 - Технологическая карта самостоятельной работы.

Коды реализуемых компетенций, индикаторов	Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельной работы	Средства и технологии оценки	Объем часов, в том числе		
				СРС	Контактная работа с преподавателем	Всего
1 семестр						
ПК-1 ИД-1 _{ПК-1} ИД-2 _{ПК-1} ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ИД-7 _{ПК-3}	Компьютерное моделирование с использованием графических редакторов	Отчеты по лабораторным работам	Зачетное задание (контрольная точка), выполнение индивидуальных (групповых) заданий из лабораторных работ	25.50	1.50	27.00
ПК-1 ИД-1 _{ПК-1} ИД-2 _{ПК-1} ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ИД-7 _{ПК-3}	Самостоятельное изучение литературы	Конспект	Собеседование по вопросам для собеседования	12.75	0.75	13.50
ПК-1 ИД-1 _{ПК-1} ИД-2 _{ПК-1} ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ИД-7 _{ПК-3}	Курсовой проект	Отчет по курсовому проекту, доклад на защиту и презентация	Защита курсового проекта, комиссия, оценка курсового проекта	25.50	1.50	27.00
Итого за семестр				63.75	3.75	67.50
Всего				63.75	3.75	67.50
ПК-1 ИД-1 _{ПК-1} ИД-2 _{ПК-1} ИД-3 _{ПК-1} ПК-3 ИД-2 _{ПК-3} ИД-4 _{ПК-3} ИД-7 _{ПК-3}	Подготовка к экзамену	Экзамен	Оценка ответов по экзаменационным билетам	25.50	1.50	27.00
Всего				89.25	5.25	94.50

Для успешного освоения дисциплины, необходимо выполнить указанные в таблице 1 виды самостоятельной работы, используя рекомендуемые источники информации.

Основная литература:

Богомолов, С. И. Введение в системы радиосвязи и радиодоступа Электронный ресурс: Учебное пособие / С. И. Богомолов. - Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Эль Контент, 2012. - 152 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-4332-0064-7, экземпляров неограничено.

Велигоша, А. В. (Северо-Кавказский федеральный университет). Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства: Курс лекций: Направление подготовки 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи. / А. В. Велигоша; Сев.-Кав. федер. ун-т. – Ставрополь : СКФУ, 2016. – 471 с.

Основы теории антенн и распространения радиоволн Электронный ресурс: учебное пособие / Ю.М. Сподобаев / М.Ю. Сподобаев / В.А. Ружников / В.П. Кубанов; ред. В.П. Кубанов. - Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2016. - 257 с. - Книга находится в базовой версии ЭБС IPRbooks. - ISBN 978-5-9912-0152-0, экземпляров неограничено.

Дополнительная литература:

Яковлев, С. В. (Северо-Кавказский федеральный университет). Электромагнитные поля и волны: учеб. пособие: Направление подготовки 210700.62 – Инфокоммуникационные технологии и системы связи. Профиль подготовки – Сети связи и системы коммуникаций. Бакалавриат / С. В. Яковлев; Сев.-Кав. федер. ун-т. – Ставрополь: СКФУ, 2013. – 217 с.: ил.

Синицын, Ю.И. Антенно-фидерные устройства в компьютерных сетях и системах связи Электронный ресурс: учебно-методическое пособие / Е.И. Ряполова / Ю.И. Синицын. - Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2014. - 113 с. - Книга находится в базовой версии ЭБС IPRbooks., экземпляров неограничено.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

При самостоятельном изучении тем лекционных занятий и заданной литературы студентам рекомендуется:

- в день проведения занятий проработать, изученный на занятии учебный материал по конспекту. При этом необходимо выделить вопросы, на которые следует обратить большее внимание при дальнейшем изучении текущей темы. После проработки учебного материала необходимо ответить на, рекомендуемые контрольные вопросы;
- с целью качественного закрепления изученного материала в последующем следует более детально проработать учебный материал с использованием рекомендованной литературы. Студентам рекомендуется выделить вопросы, требующие более детальной проработки с помощью преподавателя;
- накануне проведения лекции студенту рекомендуется закрепить ранее изученный теоретический материал, подготовить вопросы, требующие уточнения у преподавателя.

Рекомендации по организации работы с литературой

Для овладения, закрепления и систематизации знаний студентам рекомендуется самостоятельная работа с рекомендованной литературой и конспектом лекций. При самостоятельной работе с рекомендованной литературой студентам рекомендуется проводить конспектирование учебного материала, изложенного в рекомендованных источниках.

Конспектирование источников проводится при детальном изучении темы, при этом студентам рекомендуется:

- дополнять конспект лекционного занятия путем его расширения по наиболее важным вопросам, рассмотренным на занятии. Конспектирование источников заключается в дополнении конспекта следующими положениями:
- основные определения и их физический смысл;
- основные математические соотношения с раскрытием их физического смысла;
- выводы по учебным вопросам, изучаемой теме занятий.

Контроль этого вида самостоятельной работы осуществляется на учебных занятиях путем проверки преподавателем конспекта лекций и собеседования.

При конспектировании источников студенты должны исходить из рационального объема, конспектируемого материала. Конспект должен быть кратким и понятным при его использовании после изучения текущей темы.

При конспектировании источников рекомендуется отдельные рисунки, наиболее важные их фрагменты, наиболее важные формулы выделять цветом. При ведении конспекта на занятии рекомендуется заполнять две трети страницы листа тетради по вертикали, а свободную часть использовать при дополнении конспекта, по изучаемому вопросу.

Для успешного освоения дисциплины, необходимо самостоятельно детально изучить представленные темы по рекомендуемым источникам информации.

Конспектирование источников оценивается удовлетворительно и неудовлетворительно. Работа по конспектированию источников оценивается удовлетворительно если:

- конспект имеет достаточный объем детализации по, изучаемой теме, обеспечивающий заданный уровень освоения теоретического материала дисциплины;
- конспект оформлен аккуратно, изучаемый материал изложен последовательно в соответствии с порядком изучения дисциплины, содержит обобщающие выводы по каждой теме.

Работа по конспектированию источников оценивается неудовлетворительно, если не выполнены требования на оценку удовлетворительно.

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Методические указания при подготовке к лабораторной работе

Подготовку к лабораторной работе рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- уяснить тему и цель, предстоящей лабораторной работы;
- изучить теоретический материал в соответствии с темой лабораторной работы (рекомендуется использовать рекомендованную литературу, конспект лекций, учебное пособие (практикум по лабораторным работам));
- ознакомиться с оборудованием и материалами, используемыми на лабораторной работе (при использовании специализированного оборудования или программного обеспечения необходимо изучить порядок и правила его использования).

Методические указания при выполнении лабораторной работы

При выполнении лабораторной работы студенты должны строго соблюдать, установленные требования безопасности.

При выполнении лабораторной работы студентам рекомендуется:

- уяснить цель, выполняемых заданий и способы их решения;
- задания, указанные в лабораторной работе выполнять в той последовательности, в которой они указаны в лабораторном практикуме;

- при выполнении практического задания и изучении теоретического материала использовать помощь преподавателя;
- оформить отчет по лабораторной работе;
- ответить на контрольные вопросы.

Методические указания при подготовке к защите лабораторной работы

При подготовке к защите лабораторной работы студентам рекомендуется:

- подготовить отчет по лабораторной работе;
- подготовить обоснование, сделанных выводов;
- закрепить знания теоретического материала по теме лабораторной работы (рекомендуется использовать контрольные вопросы);
- знать порядок проведения расчетов (проводимых исследований);
- уметь показать и пояснить порядок исследований при использовании специализированного оборудования или программного обеспечения.

Защита лабораторной работы осуществляется путем собеседования студента с преподавателем. При собеседовании студент представляет на проверку отчет по лабораторной работе. Собеседование со студентом, претендующим на оценку «отлично» проводится по вопросам и практическим заданиям повышенного уровня обучения. Собеседование со студентом, не претендующим на оценку «отлично» проводится по вопросам и практическим заданиям базового уровня обучения.

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ СОБЕСЕДОВАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ЛИТЕРАТУРЫ

Базовый уровень:

Тема 1. Распространение радиоволн над поверхностью земли с учетом влияния реальной неоднородной атмосферы.

1. Классификация радиоволн и радиолиний.
2. Множитель ослабления и принципы расчета радиолиний.
3. Помехи радиоприему.

Тема 2. Распространение тропосферных волн.

4. Рефракция в тропосфере
5. Эффекты, сопровождающие распространение радиоволн в тропосфере

Тема 3. Влияние ионосферы на распространение радиоволн. Распространение коротких волн.

6. Строение ионосферы.
7. Образование ионизированной области в ионосфере.
8. РРВ в ионизированном газе и при наличии постоянного магнитного поля.

Тема 4. Распространение УКВ радиоволн на спутниковых радиолиниях.

9. Потери в тракте распространения на космических радиолиниях.
10. Особенности распространения средних волн.
11. Особенности распространения длинных волн.

Тема 5. Параметры, характеризующие направленные и поляризационные свойства антенн.

12. Роль и место АФУ в системах радиосвязи.
13. Классификация антенн.

Тема 6. Теоретические основы построения антенных решеток.

14. Общая характеристика методов получения узких ДН.
15. Линейные антенные решетки с равноамплитудным распределением.

Тема 7. Основные типы антенн УКВ диапазона.

16. Антенные решетки поперечного излучения.

17. Антенные решетки продольного излучения.

Тема 8. Антенны коротких волн. Антенны длинных и средних волн.

18. Антенны длинных.

19. Антенны средних волн.

Тема 9. Общие сведения о синтезе антенн.

20. Постановка задачи синтеза антенн.

Повышенный уровень:

Тема 1. Распространение радиоволн над поверхностью земли с учетом влияния реальной неоднородной атмосферы.

21. Среды распространения, их свойства и влияние на РРВ.

Тема 2. Распространение тропосферных волн.

22. Множитель ослабления тропосферных волн

Тема 3. Влияние ионосферы на распространение радиоволн. Распространение коротких волн.

23. Эффекты, сопровождающие распространение радиоволн в ионосфере.

24. Множитель ослабления ионосферных волн.

Тема 4. Распространение УКВ радиоволн на спутниковых радиолиниях.

25. Энергетические соотношения на космических радиолиниях.

Тема 5. Параметры, характеризующие направленные и поляризационные свойства антенн.

26. Параметры и характеристики антенно-фидерных устройств систем радиосвязи.

Тема 6. Теоретические основы построения антенных решеток.

27. Антенные решетки с управляемой диаграммой направленности.

Тема 7. Основные типы антенн УКВ диапазона.

28. Апертурные антенны.

Тема 8. Антенны коротких волн. Антенны длинных и средних волн.

29. Антенны коротких волн.

Тема 9. Общие сведения о синтезе антенн.

30. Классические методы решения задачи синтеза.

Критерии оценивания компетенций:

Оценка «отлично» выставляется студенту, если студент дал полный, развернутый ответ на поставленный вопрос, при этом показана совокупность осознанных знаний по теме дисциплины, доказательно раскрыты основные положения вопроса; в ответе прослеживается четкая структура, логическая последовательность, отражающая сущность раскрываемых понятий. Ответ изложен литературным языком с использованием технической терминологии. Могут быть допущены недочеты в определении понятий, исправленные студентом самостоятельно в процессе ответа. Ситуационная задача по теме решена правильно.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если студент дал полный, развернутый ответ на поставленный вопрос, при этом показано умение выделить существенные и несущественные признаки, причинно-следственные связи. Ответ четко структурирован, логичен, изложен литературным языком с использованием технической терминологии. Могут быть допущены 2-3 неточности или незначительные ошибки, исправленные студентом с помощью преподавателя. Ситуационная задача по теме решена правильно, но при ее решении допущено не более одной ошибки.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если студент дал недостаточно полный и недостаточно развернутый ответ. Логика и последовательность изложения имеют нарушения. Допущены ошибки в раскрытии понятий, употреблении терминов. Студент не

способен самостоятельно выделить существенные и несущественные признаки и причинно-следственные связи. В ответе отсутствуют выводы. Умение раскрыть значение обобщенных знаний не показано. Речевое оформление требует поправок, коррекции. Ситуационная задача по теме решена правильно, но при ее решении допущено не более двух ошибок.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если ответ представляет собой разрозненные знания с существенными ошибками по вопросу. Присутствуют фрагментарность, нелогичность изложения. Студент не осознает связь обсуждаемого вопроса с другими вопросами темы. Отсутствуют выводы, конкретизация и доказательность изложения. Речь неграмотная, терминология не используется. Дополнительные и уточняющие вопросы преподавателя не приводят к коррекции ответа студента, или ответ на вопрос полностью отсутствует или студент отказался от ответа. Ситуационная задача по теме решена неправильно.

Описание шкалы оценивания

Оценка за ответы на вопросы в ходе собеседования определяется в соответствии с таблицей.

Оценка	Оценка за теоретический вопрос базового уровня	Оценка за теоретический вопрос повышенного уровня	Примечание
отлично	Отлично (хорошо)	Отлично	Оценка хорошо допускается только по вопросу базового уровня
хорошо	Хорошо (удовлетворительно)	Хорошо	Оценка удовлетворительно допускается только по вопросу базового уровня
удовлетворительно	Удовлетворительно	Удовлетворительно	
неудовлетворительно	По одному или двум вопросам получена оценка неудовлетворительно		

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Процедура проведения данного оценочного мероприятия включает в себя собеседование по двум теоретическим вопросам из числа перечисленных. Один вопрос относится к базовому уровню, а второй – к повышенному. В ходе собеседования студент имеет право пользоваться собственным конспектом.

Предлагаемые студенту вопросы позволяют проверить профессиональные компетенции ПК-1, ПК-3. Принципиальные отличия заданий базового уровня от повышенного заключаются в сложности вопросов по уровню обученности «понимание».

Для подготовки к данному оценочному мероприятию необходимо 13,5 часов в 1-м семестре. Студент должен подготовить письменные ответы на перечисленные теоретические вопросы в виде конспекта учебного материала и на их основании подготовиться к указанным в методических материалах вопросам для обсуждения.

При проверке задания, оцениваются активное участие в работе; уверенное владение материалом; умение четко и логично излагать свои мысли; умение творчески подходить к решению основных вопросов темы; самостоятельность мышления, полное соответствие конспекта установленным требованиям; амостоятельная устная речь, полностью раскрывающая суть суть проблематики собеседования.

Оценочный лист

		Вид работы	
--	--	------------	--

№ п/п	Фамилия, имя студента.	Работа с дополнительными источниками информации	Ответы на промежуточные вопросы	Логика и научность изложения	Формулирование выводов и доказательств	Выступление с результатами работы	Участие в дискуссии, умение вести диалог	Итог
1								
2								
...								

6. ВОПРОСЫ ДЛЯ СОБЕСЕДОВАНИЯ ПРИ ПРОВЕРКЕ ГОТОВНОСТИ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Практическая работа 1. Моделирование и исследование процесса распространения земных радиоволн.

1. Дальность расстояния прямой видимости.
2. Модель процесса распространения радиоволн при поднятых антеннах для плоской земли.

Практическая работа 2. Моделирование и исследование процесса распространения тропосферных радиоволн.

3. Множителя ослабления тропосферной радиолинии.

Практическая работа 3. Моделирование и исследование процесса распространения ионосферных радиоволн.

4. Множителя ослабления ионосферной радиолинии.

Практическая работа 4. Моделирование и исследование процесса распространения радиоволн на спутниковых радиолиниях.

5. Множителя ослабления спутниковой радиолинии.

Практическая работа 5. Моделирование и исследование параметров и характеристик антенн.

6. Объяснить принцип действия симметричного вибратора.
7. Что собой представляет резонансная частота вибраторной симметричной антенны?
8. Определить резонансную длину вибратора, если частота генератора $f^1 = 100\text{МГц}$; $f^2 = 200\text{МГц}$; $f^3 = 300\text{МГц}$.

Практическая работа 6. Моделирование и исследование антенных решеток.

9. Что такое антенная решетка?
10. Что такое множитель решетки?
11. Принцип работы САР.

Практическая работа 7. Моделирование и исследование вибраторных антенн.

12. Какие изменения претерпевает ДН директорной антенны при увеличении количества директоров?
13. Какую роль играет рефлектор в директорной антенне?
14. Состав директорной антенны.
15. Вид диаграммы направленности директорной антенны.

Практическая работа 8. Моделирование и исследование апертурных антенн.

16. Какова структура поля в Е - плоскостном секториальном рупоре?
17. Какова структура поля в Н - плоскостном секториальном рупоре?
18. Какими факторами определяется ширина ДН рупорной антенны?
19. Каков закон распределения амплитуды напряженности поля на излучающей поверхности рупора?

20. Каков закон распределения фазы напряженности поля на излучающей поверхности рупора?
21. Что такое токовый и апертурный методы расчета ДН?
22. Как связана ширина ДН с размерами антенны?
23. Как связано распределение поля в раскрыве параболоида с ДН облучателя?
24. Изобразите распределение тока на поверхности короткофокусного и длиннофокусного параболоидов. Что такое перекрестная поляризация?
25. Какие существуют типы облучателей параболических зеркал?
26. Как влияет на характеристики излучения затенение раскрыва облучателем?
27. Как влияет на ДН смещение облучателя из фокуса вдоль оптической оси?
28. Как влияет на ДН смещение облучателя из фокуса перпендикулярно оптической оси?
29. Каков закон распределения фазы при смещениях облучателя поперек оптической оси?
30. Чем обусловлен уровень боковых лепестков зеркальной антенны и как можно его уменьшить?
31. Какова зависимость КИП от отношения (при неизменной ДН облучателя)?
32. Как можно управлять ДН зеркальной антенны?

Практическая работа 9. Моделирование и исследование антенн с бегущей волной тока.

33. Как выглядит условие получения максимума КНД в главном направлении излучения для спиральной антенны?
34. Почему и при каких условиях спиральная антенна создает вдоль своей оси поле круговой поляризации?
35. Охарактеризуйте режимы работы спиральной антенны.

Практическая работа 1. Моделирование и исследование процесса распространения земных радиоволн.

36. Модель процесса распространения радиоволн при поднятых антеннах для сферической земли.

Практическая работа 2. Моделирование и исследование процесса распространения тропосферных радиоволн.

37. Поглощения в тропосфере.

Практическая работа 3. Моделирование и исследование процесса распространения ионосферных радиоволн.

38. Поглощения в ионосфере.

Практическая работа 4. Моделирование и исследование процесса распространения радиоволн на спутниковых радиолиниях.

39. Поглощения на спутниковой радиолинии.

Практическая работа 5. Исследование симметричных и несимметричных вибраторных антенн.

40. Перечислить основные параметры вибраторных антенн.
41. Что такое диаграмма направленности антенны?
42. Что собой представляют ДН в прямоугольной и полярной системах координат?

Практическая работа 6. Моделирование и исследование антенных решеток.

43. Какие параметры АР влияют на положение главного луча ДН?
44. Какие параметры САР влияют на ширину главного луча ДН?

Практическая работа 7. Моделирование и исследование вибраторных антенн.

45. Для чего осуществляется симметрирование и какие симметрирующие

устройства Вы знаете?

46. Где применяются антенны с вращающейся поляризацией?
47. Чем объясняются поляризационные свойства спиральной антенны?
48. Каков закон распределения фаз поля вдоль оси антенн бегущей волны?

Практическая работа 8. Моделирование и исследование апертурных антенн.

49. Как влияет амплитудное распределение в раскрыве антенны на форму ее ДН?
50. Как влияют фазовые искажения на форму ДН?
51. В какой плоскости (Е или Н) для рупора с квадратным раскрывом ($a=b$) ДН шире и почему?
52. Из каких соображений выбираются размеры излучающей поверхности и длина рупора?
53. Почему допускаемые фазовые искажения для Е и Н плоскостных рупоров имеют разную величину?
54. Чем определяется КНД рупорной антенны?
55. Как влияет наличие реакции зеркала на технические характеристики облучателя?
56. Каковы основные способы устранения реакции зеркала на облучатель?
57. Как влияет на ДН точность изготовления зеркала?
58. Назовите разновидности зеркальных антенн.
59. Как методом сравнения можно измерить коэффициент усиления?
60. Что такое электромеханическое сканирование?

Практическая работа 9. Моделирование и исследование антенн с бегущей волной тока.

61. Как влияет диаметр витка спиральной антенны на форму ее ДН?
62. Как влияет коэффициент бегущей волны спиральной антенны на форму ее ДН?
63. Как влияет количество витков спиральной антенны на форму ее ДН?

Критерии оценивания:

Критерии оценивания компетенций:

Оценка «отлично» выставляется, если студент продемонстрировал высокое умение применять полученные знания на практике через выполнение конкретного задания повышенного уровня, свободно без затруднений справился с поставленной задачей, показав владение разносторонними приемами и навыками ее выполнения, не допустил ошибок и неточностей.

Оценка «хорошо» выставляется, если студент продемонстрировал умение применять полученные знания на практике через решение конкретного задания повышенного уровня, справился с поставленной задачей, показав владение необходимыми приемами и навыками ее выполнения, при этом допустил не более одной ошибки, исправленной после указания преподавателя.

Оценка «удовлетворительно» выставляется, если студент продемонстрировал посредственное умение применять полученные знания на практике через решение конкретного задания повышенного уровня, с трудом справился с поставленной задачей, при этом допустил не более двух ошибок, исправленных после указания преподавателя, либо успешно выполнил задание базового уровня.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется, если студент не продемонстрировал умение применять полученные знания на практике через решение конкретного задания базового уровня, не справился с поставленной задачей или допустил при ее выполнении серьезные ошибки.

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Процедура проведения данного оценочного мероприятия включает в себя:

— представление оформленного отчета по лабораторной работе с выполненными разноуровневыми заданиями;

— защиту путем выполнения указанного преподавателем разноуровневого задания, причем уровень выполняемого задания определяется студентом самостоятельно.

Предлагаемые студенту задания позволяют проверить профессиональные компетенции ПК-1, ПК-3.

Для подготовки к данному оценочному мероприятию студенту отводится в 5 семестре 27 часов в рамках его самостоятельной работы.

При подготовке к ответу студенту предоставляется право пользования отчетом по лабораторной работе.

Оценочный лист

№ п/п	Фамилия, имя студента.	Вид работы						Итог
		Владение методикой выполнения задания	Правильность схематического моделирования	рабoтoспoсoбнoсть устройствa	Точность измерений и правильность расчетов параметров и характеристик	Правильность оформления схем, графиков характеристик	Формулирование выводов, их соответствие теории	
1								
2								
...								

7. ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

Вопросы для проверки уровня обученности

- 1) Классификация радиоволн и радиолиний.
- 2) Множитель ослабления и принципы расчета радиолиний. Помехи радиоприему.
- 3) Среды распространения, их свойства и влияние на РРВ.
- 4) Рефракция в тропосфере
- 5) Эффекты, сопровождающие распространение радиоволн в тропосфере
- 6) Множитель ослабления тропосферных волн
- 7) Строение ионосферы. Образование ионизированной области.
- 8) РРВ в ионизированном газе и при наличии постоянного магнитного поля.
- 9) Эффекты, сопровождающие распространение радиоволн в ионосфере.
- 10) Множитель ослабления ионосферных волн.
- 11) Потери в тракте распространения на космических радиолиниях.
- 12) Энергетические соотношения на космических радиолиниях.
- 13) Особенности распространения средних и длинных волн.
- 14) Роль и место АФУ в системах радиосвязи.
- 15) Классификация антенн.
- 16) Параметры и характеристики антенно-фидерных устройств систем радиосвязи.
- 17) Общая характеристика методов получения узких ДН.
- 18) Линейные антенные решетки с равноамплитудным распределением.

- 19) Антенные решетки с управляемой диаграммой направленности.
- 20) Антенные решетки поперечного излучения.
- 21) Антенные решетки продольного излучения.
- 22) Апертурные антенны.
- 23) Антенны коротких волн.
- 24) Антенны длинных и средних волн.
- 25) Постановка задачи синтеза антенн.
- 26) Классические методы решения задачи синтеза.

Практические задания для проверки уровня обученности

- 1) Исследование процесса распространения земных радиоволн.
- 2) Исследование процесса распространения тропосферных радиоволн.
- 3) Исследование процесса распространения ионосферных радиоволн.
- 4) Исследование процесса распространения радиоволн на спутниковых радиолиниях.
- 5) Исследование параметров и характеристик антенн.
- 6) Исследование антенных решеток.
- 7) Исследование вибраторных антенн.
- 8) Исследование апертурных антенн.
- 9) Исследование антенн с бегущей волной тока.

Критерии оценивания компетенций

(в соответствии с результатами освоения дисциплины)

Критерии оценки для проверки уровня теоретической обученности:

Оценка «отлично» выставляется студенту, если он показал глубокое, прочное и аргументированное освоение программного учебного материала, при этом поставленный вопрос раскрыт последовательно, четко и логически стройно, в полном исчерпывающем объеме, основные категории, понятия и термины учебного курса формулировались правильно, не допущено при ответе ошибок

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он показал твердое знание программного учебного материала, при этом поставленный вопрос раскрыт грамотно и по существу, в достаточно полном объеме, основные категории, понятия и термины учебного курса формулировались правильно, допущены при ответе отдельные неточности или одна ошибка

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он показал знание только основной части учебного материала без его частных деталей, при этом поставленный вопрос раскрыт с нарушением логической последовательности, не в полном объеме; были допущены неточные формулировки основных категорий, понятий и терминов учебного курса, а также ошибки (не более двух) или ряд незначительных неточностей, не исказивших существенно суть ответа.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки (более двух), существенно исказившие его суть. Оценка неудовлетворительно выставляется также, если отсутствует ответ на вопрос, либо студент отказался его сдавать.

Критерии оценки для проверки практической обученности:

оценка «отлично» выставляется, если он продемонстрировал высокое умение применять полученные знания на практике через решение конкретной задачи, свободно без затруднений справился с поставленной задачей, показав владение разносторонними приемами и навыками ее выполнения, не допустил ошибок и неточностей;

оценка «хорошо» выставляется, если он продемонстрировал умение применять полученные знания на практике через решение конкретной задачи, справился с

поставленной задачей, показав владение необходимыми приемами и навыками ее выполнения, при этом допустил не более одной ошибки;

оценка «удовлетворительно» выставляется, если он продемонстрировал посредственное умение применять полученные знания на практике через решение конкретной задачи, с трудом справился с поставленной задачей, при этом допустил не более двух ошибок;

оценка «неудовлетворительно» выставляется, если он не продемонстрировал умение применять полученные знания на практике через решение конкретной задачи, не справился с поставленной задачей или допустил при ее решении три и более серьезные ошибки.

Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций

Предлагаемые студенту задания позволяют проверить профессиональные компетенции ПК-1 и ПК-3. Для подготовки к экзамену студенту отводится 27 часов в рамках его самостоятельной работы.

Процедура проведения экзамена осуществляется в соответствии с Положением о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по образовательным программам высшего образования в СКФУ.

Экзамен по дисциплине предусмотрен в устной форме по билетам. В экзаменационный билет включаются два теоретических вопроса и одно практическое задание

Для подготовки по билету отводится 30 минут - на теоретические вопросы, 10 минут на выполнение практического задания.

При подготовке к ответу студенту предоставляется право пользования рабочей программы дисциплины, собственным конспектом лекций не более 10 минут.

Практическое задание выполняется на ПЭВМ. При проверке практического задания, оцениваются: правильность моделирования, методики исследования, точность результатов измерения, оценка погрешности.