

Федеральное агентство связи

**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования**

**ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ**

**ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕЧНАЯ СИСТЕМА**

Самара

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»**

Устройства СВЧ и антенны

Методические разработки к лабораторным работам

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕНН СВЧ

Составители: проф. Неганов В.А.
доц. Солдатов А.А.

Рецензент: проф. Зайцев В.А.

Самара
2011

Лабораторная работа №1

“Исследование характеристик рупорной антенны”

1. Цель работы

1 – изучение основных характеристик антенны; 2 – проведение экспериментальных измерений характеристик направленности рупорной антенны; 3 – изучение методов расчёта характеристик направленности рупорной антенны.

2. Литература

1. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. - М., “Высшая школа”, 1988. – 432 с.
2. Чернушенко А. Н., Петров Б. В. И др. Конструирование экранов и СВЧ-устройств.: Учебник для ВУЗов. - М.,: Радио и связь, 1990. – 351 с.
3. Драбкин А. Л. и др. Антенно-фидерные устройства. - М., “Сов. радио”, 1972. – 480 с.
4. Воскресенский Д. И., Кременецкий С. Д., Гринев А. Ю., Котов Ю. В. Автоматизированное проектирование антенн и устройств СВЧ: Учебн. пособие для ВУЗов. – М.,: Радио и связь, 1988. – 342 с.
5. Неганов В. А. Исследование волноводных ферритовых СВЧ – устройств. Мет. разработка к лаб. работе. Самара: ПИИРС, 1992. – 29 с.
6. Неганов В.А., Яровой Г.П. Теория и применение устройств СВЧ. – М.,: Радио и связь, 2006. – 719 с.
7. Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П. Современная теория и практические применения антенн. – М.,: Радиотехника, 2009. – 716 с.
8. Приложение к настоящей методической разработке.

3. Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к лабораторному занятию необходимо:

- изучить задание на работу, цель работы;
- изучить работу СВЧ генератора ГЗ–14А и селективного усилителя (см. [5]);
- изучить работу измерительной линии;
- изучить методику измерения характеристик рупорной антенны;
- получив у преподавателя номер варианта, рассчитать диаграмму направленности и оценить коэффициент усиления открытого конца прямоугольного волновода;
- получить у преподавателя допуск к проведению экспериментальных исследований.

4. Контрольные вопросы

1. Рассказать о дальней зоне излучения антенны. Какими характеристиками она описывается?
2. Перечислить основные характеристики антенны?
3. Записать характеристику направленности в векторной форме. Дать определения нормированной и ненормированной характеристик направленности антенны.
4. Дать характеристику способам графического представления характеристик направленности антенны на плоскости.
5. Как определяется ширина диаграммы направленности по заданному уровню и как определяется уровень боковых лепестков?
6. Дать определение коэффициента усиления антенны.
7. Способы измерения коэффициента усиления антенны.
8. Как можно приближённо оценить величину коэффициента усиления?
9. Дать определения дальней, промежуточной и ближней зон излучения антенны.
10. К какому классу излучателей относится рупорная антенна? Каковы её особенности?

5. Расчётная часть

5.1 Получив у преподавателя номер варианта (см. табл. I) и пользуясь формулами, приведёнными в приложении 1, и литературой [1-7], рассчитать коэффициент отражения Γ от открытого конца волновода и его диаграммы направленности в плоскостях E и H.

5.2 Пронормировать диаграммы направленности.

5.3 Нарисовать диаграммы направленности антенны в полярной системе координат.

5.4 По формуле (2) рассчитать коэффициент усиления рупорной антенны.

Таблица 1

№ варианта	1	2	3	4
Рабочая частота f , ГГц	10	14	4	8
Сечение волновода, мм ²	23×10	16×8	40×20	28×12

6. Описание экспериментальной установки и порядок выполнения работы. Структурная схема установки приведена на рис.1.

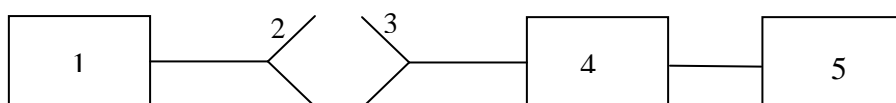


Рис.1. Структурная схема измерительной установки:

1. Генератор СВЧ Г4-81;
2. Исследуемая рупорная антенна;
3. Приёмная антенна;
4. Детекторная секция;
5. Измерительный усилитель У2-8.

6.1 Проверить работоспособность установки

Прежде всего необходимо удостовериться в наличии СВЧ мощности на выходе СВЧ – генератора, что устанавливается по наличию показания измерительного усилителя 5 при всех включенных приборах по схеме рисунка 1 (см. [5]), и возможности изменения мощности с помощью переключателя мощности генератора Г4 – 80. выставить на генераторе максимальную мощность и заданную преподавателем, согласно таблице 1, частоту.

Подготовить измерительную установку к измерениям

Вращаем поворотное устройство измерительной рупорной антенны, добиться максимальных показаний измерительного усилителя 5. причем рупорную антенну необходимо вращать как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. В случае зашкаливания стрелки индикатора измерительного усилителя У2-8, следует переключить шкалу измерительного усилителя (см. [5]) или при необходимости уменьшить мощность генератора Г4-80, аттенуатором мощности генератора. Установку можно считать подготовленной к работе, если стрелка индикатора измерительного усилителя находится в максимальном положении.

Снять диаграмму направленности (ДН) рупорной антенны

Для этого, прежде всего, необходимо определить характер ДН исследуемой антенны (вращая поворотное устройство по горизонтальной плоскости), оценить ширину основного лепестка, установить наличие боковых лепестков (в некоторых случаях их может и не быть). Исходя из полученной информации, следует определить интервал между будущими отсчетными точками в градусах по горизонтальной шкале поворотного устройства ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$).

В характеристике диаграммы направленности должны быть изменены характерные точки (максимумы и минимумы), а для основного лепестка необходимо измерить ДН в 6...10 точках; для боковых лепестков количество точек можно ограничить 3...4.

Установленный первоначально уровень мощности на индикаторе усилителя при $\theta = \theta_0 = 0$ принимается за F_{max} . плавно вращая поворотное устройство с исследуемой антенной в горизонтальной плоскости через

определенный заранее шаг $\Delta\theta$, снимается показание усилителя – $F(\theta_i)$. Необходимо взять квадратный корень из измеренных значений, что соответствует переходу от изменений по мощности к изменению по полю. Затем производится нормировка снятых показаний индикатора по формуле:

$$f(\theta_i) = \sqrt{F(\theta_i) / F_{max}}$$

и результаты заносятся в таблицу 2. Измерения снимаются при вращении рупорной антенны на поворотном устройстве против часовой стрелки на 90^0 и почасовой стрелке на 90^0 .

Построить диаграмму направленности в полярной и декартовой (прямоугольной системе координат)

Подробнее о способах изображения ДН антенны см. [1], [6] и в приложении 1.

6.5 Определить ширину диаграммы направленности, построенной в полярной системе координат, на уровне 0.707 главного лепестка.

Таблица 2

Угол θ , в градусах	θ_0	θ_1	...	θ_n
Показания измерительного усилителя в отн. ед.				
Нормированная диаграмма направленности				

6.6 Сравнить рассчитанную в задании пункта 5 настоящих методических указаний ДН с экспериментальной кривой. Рассчитать процентное расхождение между теоретической и экспериментальной кривыми

6.7 Измерить поляризационную характеристику $F(\varphi)$ рупорной антенны в главном направлении

Аналогично п. 6.2 подготовить измерительную установку к измерениям. Поворачивая приемный рупор измерительной установки вокруг вертикальной оси (вокруг продольной оси антенны), снять зависимость значений измерительного усилителя $F(\varphi_i)$ от угла поворота φ_i через каждые 10^0 от 0 до 360^0 . Результаты измерений занести в таблицу 3. произвести нормировку показаний индикатора измерительного усилителя по максимальному значению:

$$f_i = \sqrt{F(\varphi_i) / F_{max}} .$$

6.8 Построить поляризационную характеристику излучения рупорной антенны в полярной системе координат (см. [6])

Поляризационная характеристика в полярной системе координат изображается, как показано на рис. 4 приложения 1. Следует учесть, что каждое измерение откладывается дважды на прямых, симметрично начала координат.

Таблица 3

Угол поворота φ , град	10	20	30	...	360
Показания индикатора усилителя в отн. ед.					
Нормированные значения поляризационной хар-ки					

6.9 Измерить коэффициент усиления рупорной антенны абсолютным методом

Собрать установку согласно схеме рис.1. Выставить на аттенюаторе мощности генератора максимальный уровень ослабления (порядка 22-25 дБ); выставить в горизонтальной плоскости $\theta=0$. Вращением измерительного рупора, добиться максимального показания индикатора усилителя. Записать показания аттенюатора мощности генератора N_{II} . Отсоединить плоскую передающую антенну от генератора и подключить к генератору коаксиально-волноводный переход. Детекторную секцию 4 (рис. 1) отключить от выхода приемной рупорной антенны на поворотном устройстве и подключить к генератору коаксиально-волноводный переход. При этом показания индикатора измерительного усилителя резко возрастают. Регулировкой аттенюатора мощности генератора установить стрелку индикатора измерительного усилителя на уровень, соответствующий предыдущему измерению. При этом записать показания аттенюатора генератора $N_{ПЕР}$ в дБ в таблицу 4.

Таблица 4

N_{II}	$N_{ПЕР}$	$4\pi r/\lambda$	G	G , дБ

Здесь r - расстояние между передающей и приемной антеннами ($r \approx 70...100$ см.), λ - длина волны (определяется через частоту, выставленную на генераторе).

Определение значения искомого коэффициента усиления G в разгах производится по формуле:

$$G = \frac{1}{G_{IP}} \left[\frac{4\pi r}{\lambda} \right]^2 10^{\frac{N_i - N_{iAB}}{10}}. \quad (1)$$

Где значение G_{IP} зависит от конструкции приемной антенны и для рупорной антенны вычисляется по формуле :

$$G_{IP} = 4\pi(0,65S) / (\lambda^2), \quad (2)$$

где S – площадь раскрыва приемной рупорной антенны.

Коэффициент усиления антенны в децибелах определяется соотношением:

$$G_{dB} = 20 \lg \left[\frac{4\pi r}{\lambda} \right] + [N_i - N_{iAB}] - 10 \lg G_{IP}.$$

Результаты расчета коэффициента усиления исследуемой антенны занести в таблицу 4.

Измерить размеры исследуемой рупорной антенны. Рассчитать коэффициент усиления исследуемой антенны по выше приведенной формуле (2). Сравнить значение коэффициента усиления полученного при измерении и рассчитанного коэффициента усиления.

7. Вычисление КПД излучателя

Для вычисления КПД излучателя, можно воспользоваться следующей формулой:

$$\hat{E}_{iA} = \frac{G}{D}, \quad (3)$$

где G – коэффициент усиления, измеренный выше;

D – коэффициент направленного действия, который рассчитывается по формуле:

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F^2(Q, \phi) \sin Q \cdot dQ d\phi}.$$

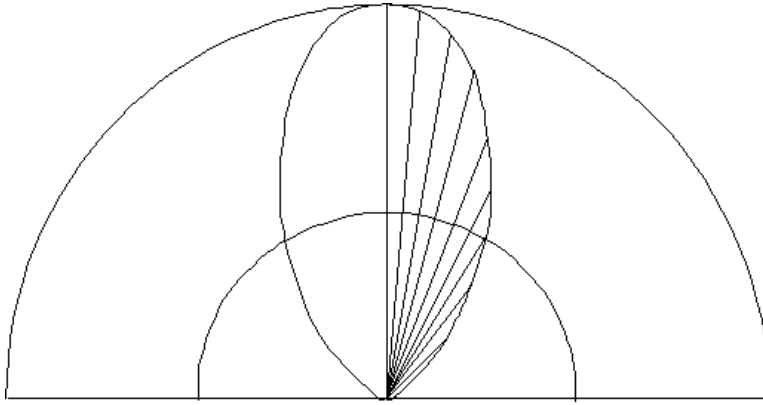
Если учесть, что у нас излучение по ϕ равномерное и $F(Q, \phi) = F(Q)$, а интеграл по ϕ от 0 до 2π равен 2π .

В этом случае, последнюю формулу можно переписать в виде:

$$D = \frac{2}{\int_0^\pi F^2(Q) \sin Q \cdot dQ}.$$

Рассмотрим измеренную диаграмму направленности

1 ΔQ



Разобьем правую часть на 10 секторов с шагом $\Delta Q (\Delta Q \approx 15^\circ)$. $F(Q_i)$ – 10 значений от F_{min} до $F_{max} = 1$. Т.к. диаграмма направленности симметрична относительно плотности $Q=0$, то получаем:

$$D = \frac{1}{\int_0^\pi F^2(Q) \sin Q \cdot dQ} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n F^2(Q_i) \sin Q_i \Delta Q_i}$$

Вычислите коэффициент направленного действия D в среде **Mathcad** . По формуле (3) рассчитайте К.П.Д. рупорной антенны.

8. Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- наименование работы;
- цель работы;
- результаты расчёта (диаграммы направленности , коэффициент усиления (измеренный и расчетный) и К.П.Д.);
- функциональные схемы измерений (в виде графиков и таблиц);
- ВЫВОДЫ.

Лабораторная работа №2

“Исследование характеристик спиральной цилиндрической антенны”

1. Цель работы

- изучение основных характеристик антенны;
- проведение экспериментальных измерений характеристик направленности спиральной цилиндрической антенны;
- проведение экспериментальных измерений поляризационной характеристики спиральной цилиндрической антенны;
- изучение методов расчёта характеристик направленности спиральной цилиндрической антенны.

2. Литература

1. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. - М., “Высшая школа”, 1988 . – 432 с.
2. Чернушенко А. Н., Петров Б. В. И др. Конструирование экранов и СВЧ–устройств.: Учебник для ВУЗов. - М.,: Радио и связь, 1990. – 351 с.
3. Дабкин А. Л. и др. Антенно-фидерные устройства. - М., “Сов. радио”, 1972 . – 480 с.
4. Воскресенский Д. И., Кременецкий С. Д., Гринев А. Ю., Котов Ю. В. Автоматизированное проектирование антенн и устройств СВЧ: Учебн. пособие для ВУЗов. – М.,: Радио и связь, 1988 . – 342 с.
5. Неганов В. А. Исследование волноводных ферритовых СВЧ – устройств. Мет. разработка к лаб. работе. Самара: ПИИРС, 1992 . – 29 с.
6. Неганов В.А., Яровой Г.П. Теория и применение устройств СВЧ. – М.,: Радио и связь, 2006. – 719 с.
7. Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П. Современная теория и практические применения антенн. – М.,: Радиотехника, 2009. – 716 с.
8. Приложение к настоящей методической разработке.

3. Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к лабораторному занятию необходимо:

- изучить задание на работу, цель работы;
- изучить работу СВЧ генератора ГЗ–14А и селективного усилителя (см. [5]);
- изучить методику измерения характеристик спиральной антенны;
- получить у преподавателя допуск к проведению экспериментальных исследований.

4. Контрольные вопросы

1. Дать определение основных характеристик антенн.
2. К какому классу излучателей относится спиральная антенна?
3. Рассказать о поляризационных характеристиках антенн.
4. Рассказать о четырёх основных видах диаграммы направленности антенн.
5. Дать определение коэффициента направленности антенны.
6. Как связаны между собой коэффициент усиления и коэффициент направленности?
7. Какие существуют способы изображения диаграммы направленности $F(\theta, \varphi)$?
8. Каково устройство и принцип действия спиральной антенны?
9. На основании чего выбираются все размеры спиральной антенны и каковы режимы работы спиральной антенны?
10. Чему равен коэффициент замедления фазовой скорости и от чего он зависит?
11. Каким образом снимаются диаграмма направленности и поляризационная характеристика спиральной антенны?

5. Расчётная часть

Исследуемая цилиндрическая спиральная антенна имеет следующие размеры (см. рис.10 приложения 2):

$$D = 3.1\tilde{m} ; d = 0.3\tilde{m} ; S = 2.5\tilde{m} ; N = 4 ; \alpha = 14.3 ,$$

где D – диаметр цилиндрической антенны; d – диаметр провода; N – число витков спирали; S – шаг спирали.

В таблице 1 для каждой бригады указаны частоты, на которых необходимо рассчитать характеристики спиральной антенны.

Таблица 1

№ бригады	1	2	3	4
Рабочая частота f , ГГц	4	4,2	4,8	5,4

5.1 На основании формул (см. приложение), приняв $\xi = 2,322$, определить длины волн λ_1 и λ_2 ,соответственно, при которых получается в главном направлении максимальный КНД и круговая поляризация.

5.2 Рассчитать ДН спиральной антенны. Произвести нормировку по максимальному значению. Построить нормированную ДН в декартовой системе координат. Определить ширину ДН по уровню 0,5.

5.3 Рассчитать ширину ДН по формуле Крауса:

$$2Q = \frac{52}{\frac{l}{\lambda} \sqrt{\frac{L}{\lambda}}}, \text{ ддддд } ,$$

где l – длина одного витка;
 L – длина спиральной антенны,
и сравнить её с измеренной в п. 6.3.

6. Описание экспериментальной установки и порядок выполнения работы.

Структурная схема установки приведена на рис.1.

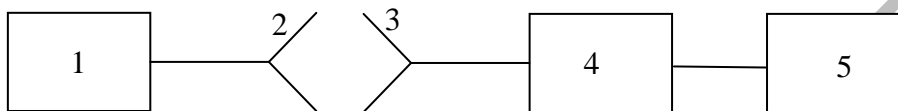


Рис.1. Структурная схема измерительной установки.

1. Генератор СВЧ Г4-81;
2. Исследуемая рупорная антенна;
3. Приёмная антенна;
4. Детекторная секция;
5. Измерительный усилитель У2-8.

Исследования характеристик направленности антенны проводятся следующим образом:

6.1 Проверить работоспособность установки

Прежде всего необходимо удостовериться в наличии СВЧ – мощности на выходе СВЧ – генератора, что устанавливается по наличию показаний измерительного усилителя 5, и возможности её измерения с помощью переключателя мощности генератора Г4-81. Выставить на генераторе частоту 4,4 ГГц.

6.2 Подготовить измерительную установку к измерениям

Вращая поворотное устройство, добиться максимальных показаний прибора измерительного усилителя 5. Причём, рупорная антенна поворотного устройства вращается как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. В случае зашкаливания прибора усилителя следует убавить мощность генератора Г4-81, вращая аттенюатор генератора. Установку можно считать

подготовленной к работе, если стрелка индикатора измерительного усилителя находится в максимальном положении.

6.3 Измерить диаграмму направленности спиральной антенны

Для этого прежде всего необходимо определить характер диаграммы направленности исследуемой антенны (вращая поворотное устройство), оценить ширину основного лепестка, установить наличие боковых лепестков. Исходя из полученной информации, следует определить интервал между будущими отсчётными точками в градусах по горизонтальной шкале поворотного устройства ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$).

В характеристике диаграммы направленности должны быть отмечены характерные точки (максимумы и минимумы), а для основного лепестка необходимо снять показания в 6...8 точках; для боковых лепестков количество точек можно ограничить до 2...3 (иногда боковых лепестков нет).

Установленный первоначально уровень мощности на индикаторе усилителя при $\theta = \theta_0 = 0$ принимается за F_{max} . Плавно вращая поворотное устройство через определённый ранее шаг $\Delta\theta$, снимаются показания усилителя – $F(\theta_i)$. Результаты заносятся в табл.2. Измерения снимаются, вращая антенну на поворотном устройстве против часовой стрелки на 90° и по часовой стрелке на 90° .

Значения нормированной амплитудной характеристики направленности находятся по формуле

$$f(\theta_i) = \sqrt{F(\theta_i) / F_{max}}.$$

6.4 Построить диаграмму направленности в полярной и в прямоугольной системах координат (линейный и логарифмический масштабы)

Подробнее о способах изображения ДН антенны см. [1] (стр. 193), [6] и в приложении 1.

6.5 Определить ширину диаграммы направленности, построенной в полярной системе координат, на уровне 0,707 главного лепестка

Таблица 2

Против часовой стрелки			Направление вращения антенны	По часовой стрелке		
θ_n	...	θ_0		θ_0	...	θ_n
			Показания индикатора в отн. ед.			
			Показания индикатора в дБ			
			Нормированная			

			диаграмма направленности в отн. ед.			
			Нормированная диаграмма направленности в дБ			

По формуле (2) в Приложении 2 к настоящей методической разработке рассчитать диаграмму направленности, построить теоретическую ДН в полярной системе координат.

6.6 Измерить поляризационную характеристику $F(\alpha)$ спиральной цилиндрической антенны в главном направлении

Аналогично п.6.2. подготовить измерительную установку к измерениям. Поворачивая приёмный рупор измерительной установки в вертикальной плоскости (вокруг продольной оси) снять зависимость значений измерительного усилителя $F(\alpha)$ от угла поворота α через каждые 10° от 0° до 180° . Результаты занести в табл.3. Произвести нормировку показаний индикатора по максимальному значению

$$f(\alpha) = \frac{F(\alpha)}{F_{max}}$$

Построить поляризационную характеристику в полярной системе координат, как показано на рис. 4 приложения 1. Следует учесть, что каждое измерение откладывается дважды на прямых симметрично начала координат.

Для лабораторной спиральной антенны диаметр $D=3,1$ см, шаг $s=2$ см, а коэффициент замедления $\zeta = 2,322$.

6.7 Снять зависимость коэффициента эллиптичности m от угла φ

Для этого, поворачивая приёмную рупорную антенну в горизонтальной плоскости от 0° до 90° (т.е. меняя угол φ), при каждом новом положении антенны через 10° определять коэффициент эллиптичности. Для определения коэффициента эллиптичности при каждом фиксированном значении φ нужно, вращая приёмный рупор в вертикальной плоскости (см. п. 6.7.), определить максимальное и минимальное показания индикатора, F_{max} и F_{min} соответственно. Коэффициент эллиптичности m определяется по формуле:

$$m = \frac{F_{min}}{F_{max}}$$

Построить график зависимости $m = F(\varphi)$. На этом же рисунке построить теоретическую кривую $m = \cos\varphi$, сравнить результаты.

Таблица 3

Угол поворота α , град	0	10	20	...	360
Показания индикатора в отн. ед.					
Нормированные значения					

6.8 Измерить коэффициент усиления антенны абсолютным методом

Собрать установку согласно схеме рис.1. Выставить на аттенуаторе мощности генератора максимальный уровень в дБ (порядка 25); выставить в горизонтальной плоскости $\varphi = 0$. Вращая измерительный рупор в вертикальной плоскости, добиться максимального показания на индикаторе усилителя. Записать показания аттенуатора мощности генератора Г4-81 Нп. Отсоединить передающую спиральную антенну от генератора и подключить к генератору через коаксиально – волноводный переход. Детекторную секцию 4 (рис.1.) отключить от выхода приёмной антенны и подключить к генератору через коаксиально – волноводный переход. При этом показания индикатора усилителя 5 резко возрастают. Регулировкой аттенуатора мощности генератора установить стрелку индикатора на уровень, соответствующий предыдущему измерению. Записать показания аттенуатора генератора $N_{пер}$ в дБ в табл.4.:

Таблица 4

N_i	$N_{пер}$	$\frac{4\pi r}{\lambda}$	G	$G, \text{дБ}$

где r – расстояние между передающей и приёмной антеннами ($r \sim 70 \dots 100$ см), λ – длина волны (определяется через частоту на генераторе $f \approx 4,4$ ГГц).

Определение значения искомого коэффициента усиления в разях производится по формуле:

$$G = \frac{1}{G_{i\delta}} \cdot \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \cdot 10^{\frac{N_i - N_{i\delta}}{10}},$$

где $G_{i\delta}$ - даётся преподавателем или вычисляется по формуле

$$G_{i\delta} = 4\pi(0,65S) / (\lambda^2).$$

Перевод G в децибелы производится по формуле:

$$G_{dA} = 20 \lg \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) + (N_{II} - N_{i\partial\partial}) - 10 \lg G_{i\partial}$$

Результаты занести в табл.4.

7. Измерение входного сопротивления антенны

Установить на генераторе частоту, при которой осуществляется максимальное излучение.

Собрать установку, согласно рис.2.

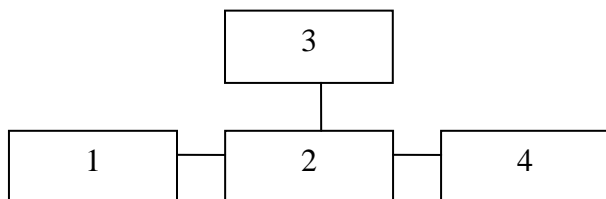


Рис.2. Структурная схема настройки измерительной линии:

1. Генератор СВЧ (ГЧ-81, ГЧ-80)
2. Измерительная линия (Р1-36)
3. Индикатор (У2-8, В3-38)
4. Короткозамыкатель

С помощью перемещения индикаторной головки по вертикали и горизонтали, настроить измерительную линию на максимальное показание шкалы индикатора.

После этого отсоединить короткозамыкатель и присоединить к измерительной линии исследуемую антенну, согласно Рис.2.

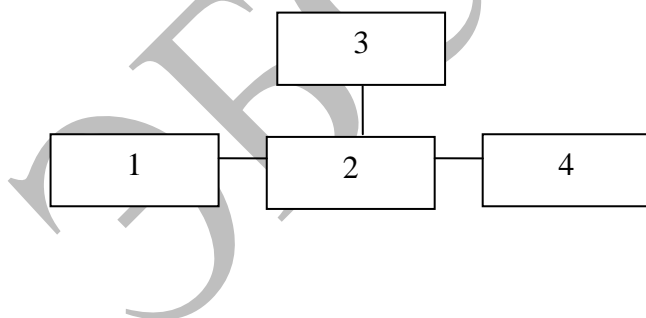


Рис.3. Структурная схема измерительной установки:

1. Генератор СВЧ (ГЧ-81, ГЧ-80)
2. Измерительная линия (Р1-36)
3. Индикатор (У2-8, В3-38)
4. Измеряемая антенна

Затем нужно снять кривую распределения напряжения вдоль фидера измерительной линии, которая примерно будет иметь вид, показанный на рис.4.

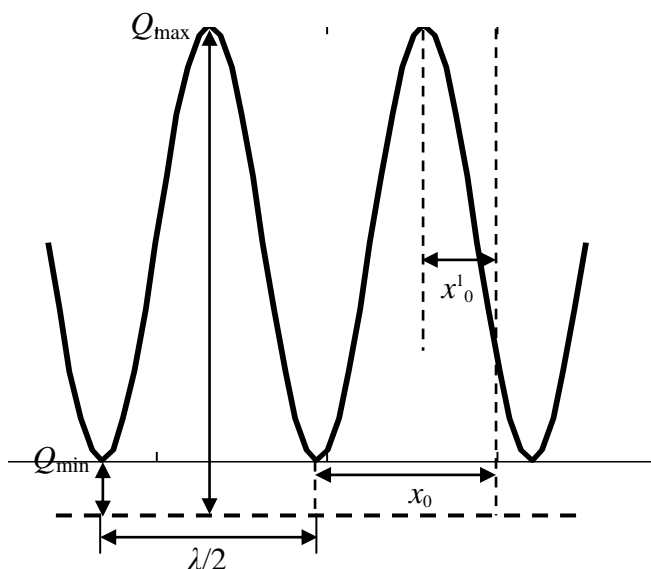


Рис.4. Примерный вид распределения напряжения вдоль фидерной линии

Для вычисления входного сопротивления антенны сначала определяется коэффициент бегущей волны K , который равен отношению ближайшего к антенне минимального значения напряжения (минимальное показание стрелки индикатора) к максимальному значению стрелки индикатора (максимальное значение стрелки индикатора).

$$K = \frac{U_{i \hat{a} \hat{e} \hat{n}}}{U_{i \hat{z} \hat{i}}}$$

Затем находится длина волны в тракте λ , которая равна удвоенному расстоянию между двумя минимумами (или максимумами) показаний стрелки индикатора.

Следующим пунктом измерения находится ближайший максимум напряжения со стороны антенны x_0^1 . (Внимание. Нужно учесть, если отсчет начинается не от нуля.) Затем находится расстояние до ближайшего минимума кривой напряжений x_0 (см. рис.3).

По формуле

$$Z_{\hat{a} \hat{e}(\hat{o})} = \rho \cdot \frac{\hat{E} + 0,5i \cdot (1 - K^2) \cdot \text{Sin} 2\psi}{\text{Cos}^2 \psi + K^2 \cdot \text{Sin}^2 \psi},$$

где

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda}(x - x_0); \quad i^2 = -1,$$

можно найти входное сопротивление как функцию от координаты x .
При $x=0$, $x^1=x$,

$$Z_{\Delta} = R_{\Delta} + iX_{\Delta} = \rho \cdot \frac{\hat{E} - 0,5i \cdot (1 - K^2) \cdot \sin(2\psi_1 \cdot x_0)}{K^2 \cdot \sin^2(\psi_1 \cdot x_0) + \cos^2(\psi_1 \cdot x_0)},$$

где

$$\psi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}, \rho = 50 \text{ Ом.}$$

8. Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- наименование работы;
- цель работы;
- функциональные схемы измерений (в виде графиков и таблиц);
- выводы.

Лабораторная работа № 3

«Исследование характеристик плоской спиральной антенны»

1. Цель работы

1 – изучение основных характеристик антенны; 2 – проведение экспериментальных измерений характеристик направленности плоской спиральной антенны; 3 – проведение экспериментальных измерений поляризационной характеристики плоской спиральной антенны; 4 – изучение методов расчета характеристик плоской спиральной антенны.

2 Литература

1. Марков Г.Т., Сазонов Д.М., Антенны. – М.: Энергия, 1976. – 528 с.
2. Антенны и устройства СВЧ /Под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1994. – 592 с.
3. Юрцев О.А. Спиральные антенны. – М.: Радио и связь, 1974. – 312 с.
4. Куртис В.Л. Спиральные антенны/Пер. с англ., под ред. Л.С. Бенсон – М.: Мир. 1964. – с. 175-193.
5. Неганов В.А. Исследование волновых ферритовых СВЧ – устройств: методическая разработка к лабораторным работам. – Самара: ПИИРС, 1992
6. Неганов В.А., Солдатов А.А. Исследование характеристик антенн СВЧ. Методическая разработка к лабораторным работам. Самара: ПИИРС, 1994. – 28 с.
7. Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П. Современная теория и практические применения антенн. – М.: Радиотехника, 2009. – 716 с.
8. Приложение к настоящей методической разработке.

3. Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

- Изучить задание на работу, цель работы;
- Изучить работу СВЧ – генератора и селективного усилителя (см. [5]);
- Изучить методику изменений характеристик плоской спиральной антенны;
- Получить у преподавателя допуск к проведению экспериментальных исследований.

4. Контрольные работы

1. Перечислить и дать определение основным характеристикам антенн.
2. Классификация спиральных антенн. И их основные характеристики и особенности.

3. Особенности и преимущества плоских спиральных антенн. Спираль Архимеда.
4. Противофазное и синфазное возбуждение плоских спиральных антенн.
5. Что обеспечивает постоянство рабочей полосы спиральных антенн?
6. Характеристика направленности спирали Архимеда.
7. Коэффициент направленного действия и коэффициент усиления плоских спиральных антенн.
8. Каким образом снимается амплитудная диаграмма направленности и поляризационная характеристика спирали Архимеда в лабораторной работе?
9. Как измеряется коэффициент усиления плоской спирали антенны в лабораторной работе.

5. Расчетная часть

Исследуемая плоская микрополосковая спиральная антенна имеет следующие размеры:

Средний радиус спиральной антенны - $\bar{a} = \lambda / 2\pi$ см; расстояние между витками равно диаметру одного витка $d = 0.04$ см; число витков $n = 15$.

В таблице 1 для каждой бригады указаны частоты, на которых необходимо рассчитать характеристики плоской спиральной антенны

Таблица 1

N бригады	1	2	3	4
f , ГГц	3.7	3.8	3.9	4

5.1 На основании формул (10) и (11), приведенных в приложении, рассчитать диаграмму направленности (ДН) плоской спиральной антенны по напряженности поля. Провести нормировку ДН по максимальному значению. Построить рассчитанную ДН в полярной и декартовой системе координат. Определить ширину ДН по уровню 0.707 в полярной системе координат.

6. Описание экспериментальной установки и порядок выполнения работы

Структурная схема установки приведена на рис. 1

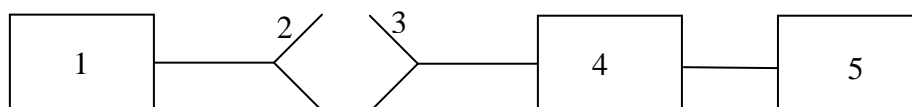


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки:

1 – генератор СВЧ Г4 – 80; 2 – исследуемая плоская спиральная антенна; 3 – приемная рупорная антенна; 4 – детекторная секция; 5 – усилитель У2 – 8.

Исследование характеристик направленности антенн производится следующим образом.

6.1 Проверить работоспособность установки

Прежде всего необходимо удостовериться в наличии СВЧ мощности на выходе СВЧ – генератора, что устанавливается по наличию показания измерительного усилителя 5 при всех включенных приборах по схеме рисунка 1 (см. [5]), и возможности изменения мощности с помощью переключателя мощности генератора Г4 – 80. выставить на генераторе максимальную мощность и заданную преподавателем, согласно таблице 1, частоту.

6.2 Подготовить измерительную установку к измерениям

Вращаем поворотное устройство измерительной рупорной антенны, добиться максимальных показаний измерительного усилителя 5. причем рупорную антенну необходимо вращать как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. В случае зашкаливания стрелки индикатора измерительного усилителя У2-8, следует переключить шкалу измерительного усилителя (см. [5]) или при необходимости уменьшить мощность генератора Г4-80, аттенуатором мощности генератора. Установку можно считать подготовленной к работе, если стрелка индикатора измерительного усилителя находится в максимальном положении.

6.3 Снять диаграмму направленности (ДН) плоской спиральной антенны

Для этого, прежде всего необходимо определить характер ДН исследуемой антенны (вращая поворотное устройство по горизонтальной плоскости), оценить ширину основного лепестка, установить наличие боковых лепестков (в некоторых случаях их может и не быть). Исходя из полученной информации, следует определить интервал между будущими отсчетными точками в градусах по горизонтальной шкале поворотного устройства ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$).

В характеристике диаграммы направленности должны быть изменены характерные точки (максимумы и минимумы), а для основного лепестка необходимо измерить ДН в 6...10 точках; для боковых лепестков количество точек можно ограничить 3...4.

Установленный первоначально уровень мощности на индикаторе усилителя при $\theta = \theta_0 = 0$ принимается за F_{max} . плавно вращая поворотное устройство с исследуемой антенной в горизонтальной плоскости через определенный заранее шаг $\Delta\theta$, снимается показание усилителя – $F(\theta_1)$.

Необходимо взять квадратный корень из измеренных значений, что соответствует переходу от изменений по мощности к изменению по полю. Затем производится нормировка снятых показаний индикатора по формуле:

$$f(\theta_i) = \sqrt{F(\theta_i) / F_{max}},$$

и результаты заносятся в таблицу 2. Измерения снимаются при вращении рупорной антенны на поворотном устройстве против часовой стрелки на 90^0 и почасовой стрелке на 90^0 .

6.4 Построить диаграмму направленности в полярной и декартовой (прямоугольной системе координат)

Подробнее о способах изображения ДН антенны см. [1], [6] и в приложении 1.

6.5 Определить ширину диаграммы направленности, построенной в полярной системе координат, на уровне 0.707 главного лепестка

Таблица 2

Угол θ , в градусах	θ_0	θ_1	...	θ_n
Показания измерительного усилителя в отн. ед.				
Нормированная диаграмма направленности				

6.6 Сравнить рассчитанную в задании пункта 5 настоящих методических указаний ДН с экспериментальной кривой. Рассчитать процентное расхождение между теоретической и экспериментальной кривыми

6.7 Измерить поляризационную характеристику $F(\varphi)$ плоской спиральной антенны в главном направлении

Аналогично п. 6.2 подготовить измерительную установку к измерениям. Поворачивая приемный рупор измерительной установки вокруг вертикальной оси (вокруг продольной оси антенны), снять зависимость значений измерительного усилителя $F(\varphi_i)$ от угла поворота φ_i через каждые 10^0 от 0 до 360^0 . Результаты измерений занести в таблицу 3. произвести нормировку показаний индикатора измерительного усилителя по максимальному значению:

$$f(\varphi_i) = \sqrt{F(\varphi_i) / F_{max}}.$$

Построить поляризационную характеристику излучения плоской спиральной антенны в полярной системе координат (см. [6] и приложение 1).

Таблица 3

Угол поворота φ , град	10	20	30	...	360
Показания индикатора усилителя в отн. ед.					
Нормированные значения поляризационной хар-ки					

6.8 Измерить коэффициент усиления плоской спиральной антенны абсолютным методом

Собрать установку согласно схеме рис.1. Выставить на аттенюаторе мощности генератора максимальный уровень ослабления (порядка 22-25 дБ); выставить в горизонтальной плоскости $\theta=0$. Вращением измерительного рупора, добиться максимального показания индикатора усилителя. Записать показания аттенюатора мощности генератора N_{II} . Отсоединить плоскую передающую антенну от генератора и подключить к генератору коаксиально-волноводный переход. Детекторную секцию 4 (рис. 1) отключить от выхода приемной рупорной антенны на поворотном устройстве и подключить к генератору коаксиально-волноводный переход. При этом показания индикатора измерительного усилителя резко возрастают. Регулировкой аттенюатора мощности генератора установить стрелку индикатора измерительного усилителя на уровень, соответствующий предыдущему измерению. При этом записать показания аттенюатора генератора $N_{ПЕР}$ в дБ в таблицу 4.

Таблица 4

N_{II}	$N_{ПЕР}$	$4\pi r/\lambda$	G	$G, \text{дБ}$

Здесь r - расстояние между передающей и приемной антеннами ($r \approx 70 \dots 100$ см.), λ - длина волны (определяется через частоту, выставленную на генераторе).

Определение значения искомого коэффициента усиления G в разях производится по формуле:

$$G = \frac{1}{G_{ID}} \left[\frac{4\pi r}{\lambda} \right]^2 10^{\frac{N_I - N_{IAD}}{10}} .$$

В последней формуле значение G_{II} зависит от конструкции приемной антенны и для рупорной антенны вычисляется по формуле :

$$G_{II} = 4\pi(0,65S) / (\lambda^2) ,$$

где S – площадь раскрыва приемной рупорной антенны.

Коэффициент усиления антенны в децибелах определяется соотношением:

$$G_{дБ} = 20 \lg \left[\frac{4\pi r}{\lambda} \right] + [N_i - N_{i\Delta D}] - 10 \lg G_{iD}.$$

Результаты расчета коэффициента усиления исследуемой антенны занести в таблицу 4.

7. Вычисление КПД излучателя

Для вычисления КПД излучателя, можно воспользоваться следующей формулой:

$$\hat{E}_{i\Delta} = \frac{G}{D}, \quad (1)$$

где G – коэффициент усиления, измеренный выше;

D – коэффициент направленного действия, который рассчитывается по формуле:

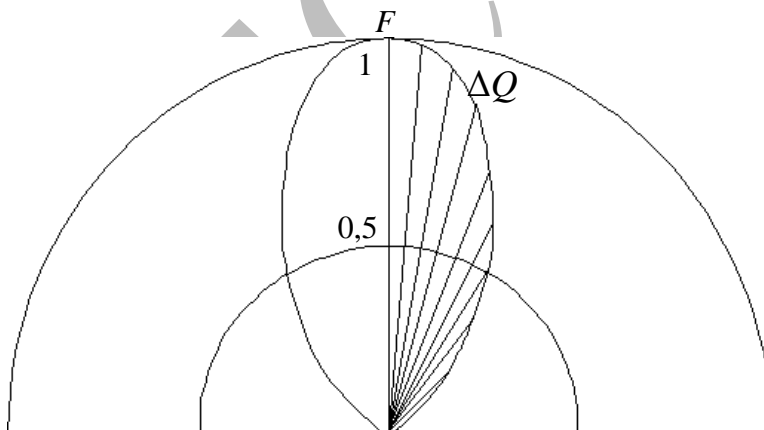
$$D = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} F^2(Q, \varphi) \sin Q dQ d\varphi}.$$

Если учесть, что у нас излучение по φ равномерное и $F(Q, \varphi) = F(Q)$, а интеграл по φ от 0 до 2π равен 2π .

В этом случае, последнюю формулу можно переписать в виде:

$$D = \frac{2}{\int_0^{\pi} F^2(Q) \sin Q dQ}.$$

Рассмотрим измеренную диаграмму направленности



Разобьем правую часть на 10 секторов с шагом $\Delta Q (\Delta Q \approx 15^\circ)$. $F(Q_i)$ – 10 значений от F_{min} до $F_{max} = 1$. Т.к. диаграмма направленности симметрична относительно плотности $Q=0$, то получаем:

$$D = \frac{1}{\int_0^{\pi} F^2(Q) \sin Q dQ} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n F^2(Q_i) \sin Q_i \Delta Q_i}$$

Вычислите коэффициент направленного действия D в среде **Mathcad** .
По формуле (1) рассчитайте К.П.Д. рупорной антенны.

8. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- Наименование работы;
- Цель работы;
- Основные расчетные формулы;
- Функциональные схемы измерений;
- Результаты расчета и эксперимента (в виде таблиц и графиков);
- Выводы

ЭБС ШТУТН

Лабораторная работа № 4

«Исследование характеристик плоской антенной решетки»

1. Цель работы

1-изучение основных характеристик антенной решетки; 2-проведение экспериментальных измерений характеристик направленности плоской антенной решетки; 3 – проведение экспериментальных измерений характеристики плоской антенной решетки; 4 – изучение методов расчета характеристик плоской антенной решетки.

2. Литература

1. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. антенны. – М.: Энергия.1976.528 с.
2. Антенны и устройства СВЧ /Пол ред. Д.И. Воскресенского. Радио и связь.1994 – 592 с.
3. Кочержевский Г.Т. Антенно-фидерные устройства. - М.: Радио и связь.1981. – 280 с.
4. Жук М.С., Молочков Ю.Б. проектирование антенно-фидерных устройств. – М.: Энергия.1966.-648 с.
5. Неганов В.А., Яровой Г.П. Теория и применение устройств СВЧ. – М.,: Радио и связь, 2006. – 719 с.
6. Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П. Современная теория и практические применения антенн. – М.,: Радиотехника, 2009. – 716 с.
7. Приложение к настоящей методической разработке.

3. Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к лабораторной работе необходимо:

- Изучить задание на работу, цель работы;
- Изучить работу СВЧ-генератора и селективного усилителя
- Изучить методику измерений плоской спиральной антенной решетки;
- Получить у преподавателя допуск к экспериментальным исследованиям.

4. Контрольные вопросы

1. Типы антенных решеток. Особенности и достоинства антенных решеток.
2. Равномерная линейная антенная решетка.
3. Получить формулу множителя антенной решетки.
4. Множитель синфазной равномерно распределенной однородной решетки.
5. Диаграмма направленности (ДН) системы двух связанных изотропных излучателей.
6. Фазированные плоские антенные решетки.
7. КНД и коэффициент усиления линейной спиральной решетки.

8. Каким образом снимается ДН и поляризационная характеристика линейной спиральной решетки в лабораторной работе?
9. Как измеряется коэффициент плоской антенной решетки?

5. Расчетная часть

Исследуемая плоская микрополосковая спиральная антенная решетка имеет следующие размеры:

Средний радиус элемента спиральной антенной решетки (спираль Архимеда) - $\bar{a} = \lambda / 2\pi$ см; расстояние между витками элемента равно диаметру одного витка $d_0 = 0.04$ см; число витков спирали Архимеда $n = 15$; число элементов в решетке $N = 4$; расстояние между центрами элементов решетки $d = 3$ см.

В таблице 1 для каждой бригады указаны частоты, на которых необходимо рассчитать характеристики плоской спиральной антенной решетки.

Таблица 1

№ бригады	1	2	3	4
Рабочая частота f , ГГц	3.8	3.86	3.95	4.04

5.1 На основании формул приведенных в приложении, рассчитать множитель направленности линейной однородной антенной решетки на заданной частоте.

5.2 Построить диаграмму направленности полученного в п.5.1 множителя системы в полярной системе координат.

5.3 Пользуясь результатами лабораторной работы № 3 «Исследование характеристик плоской спиральной антенны» для одного элемента антенной решетки на данной частоте, рассчитать и построить диаграмму направленности антенной решетки в полярной и декартовой системах координат. Определить ширину ДН по уровню 0.707 в полярной системе координат

6. Описание экспериментальной установки и порядок выполнения работы

Структурная схема установки приведена на рис. 1.

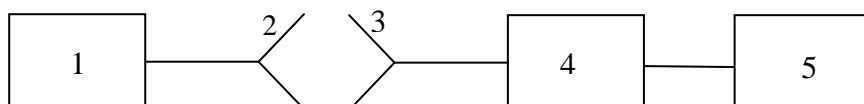


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки:

1. Генератор СВЧ Г4-80;
2. Исследуемая плоская спиральная антенная решетка;
3. Приемная рупорная антенная решетка;
4. Детекторная секция;
5. Измерительный усилитель У2-8;

Исследование характеристик направленности антенной решетки проводится следующим образом:

6.1 Проверить работоспособность установки

Прежде всего необходимо удостовериться в наличии СВЧ – мощности на выходе СВЧ –генератора, что устанавливается по наличию показаний измерительного усилителя 5 при всех включенных приборах по схеме рис.2 (см. [5]), и возможности изменения выставить на генераторе максимальную мощность и заданную преподавателем, согласно таблице 1, частоту.

6.2 Подготовить измерительную установку к измерениям

Вращаем поворотное устройство измерительной рупорной антенны вокруг горизонтальной оси, добиться максимальных показаний измерительного усилителя 5. В случае зашкаливания стрелки индикатора измерительного усилителя У2-8 следует переключить шкалу измерительного усилителя (см. [5]) или при необходимости уменьшить мощность генератора Г4-80, аттенуатором мощности генератора. Установку можно считать подготовленной к работе, если стрелка индикатора измерительного усилителя находится в максимальном положении.

6.3 Измерить диаграмму направленности плоской спиральной антенной решетки

Для этого прежде всего необходимо определить характер ДН исследуемой антенны (путем вращения поворотного устройства с исследуемой антенной решеткой), оценить ширину основного лепестка, установить наличие боковых лепестков. Исходя из полученной информации, следует определить интервал между будущими отсчетными точками в градусах по горизонтальной шкале поворотного устройства ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$).

В характеристике диаграммы направленности должны быть изменены характерные точки (максимумы и минимумы), а для основного лепестка необходимо измерить ДН в 6...10 точках; для боковых лепестков количество точек можно ограничить 3...4.

Установленный первоначально уровень мощности на индикаторе усилителя при $\theta = \theta_0 = 0$ принимается за F_{max} . плавно вращая поворотное

устройство с исследуемой антенной в горизонтальной плоскости через определенный заранее шаг $\Delta\theta$, снимается показание усилителя – $F_i(\theta)$ Необходимо взять квадратный корень из измеренных значений, что соответствует переходу от изменений по мощности к изменению по полю. Затем производится нормировка снятых показаний индикатора по формуле:

$$f(\theta_i) = \sqrt{F_i(\theta) / F_{max}}$$

и результаты заносятся в таблицу 2. Измерения снимаются при вращении рупорной антенны на поворотном устройстве против часовой стрелки на 90^0 и почасовой стрелке на 90^0 .

6.4 Построить диаграмму направленности в полярной и декартовой (прямоугольной системе координат)

Подробнее о способах изображения ДН антенны см. [1], [6] и в приложении 1.

Таблица 2

Против часовой стрелки			Направление вращения антенны	По часовой стрелке		
θ_n	...	θ_0	Показания индикатора в отн. ед.	θ_0	...	θ_n
			Показания индикатора в дБ			
			Нормированная диаграмма направленности в отн. ед.			
			Нормированная диаграмма направленности в дБ			

6.5 Определить ширину диаграммы направленности, построенной в полярной системе координат, на уровне 0.707 главного лепестка.

Сравнить рассчитанную в задании пункта 5 настоящих методических указаний ДН с экспериментальной кривой. Рассчитать процентное расхождение между теоретической и экспериментальной кривыми.

6.6 Измерить поляризационную характеристику $F(\phi)$ плоской антенной решетки в главном направлении

Аналогично п. 6.2 подготовить измерительную установку к измерениям. Поворачивая приемный рупор измерительной установки вокруг вертикальной оси (вокруг горизонтальной оси), снять зависимость значений измерительного усилителя $F(\varphi_i)$ от угла поворота φ_i через каждые 10° от 0 до 360° . Результаты измерений занести в таблицу 3. произвести нормировку показаний индикатора измерительного усилителя по максимальному значению:

$$f(\varphi_i) = \sqrt{F(\varphi_i) / F_{max}}.$$

Построить поляризационную характеристику излучения плоской спиральной решетки в полярной системе координат (см. [6]) и результаты поместить в таблицу 3.

Поляризационная характеристика в полярной системе координат изображается, как показано на рис. 4 приложения 1. Следует учесть, что каждое измерение откладывается дважды на прямых, симметрично начала координат.

Таблица 3

Угол поворота φ , град	10	20	30	...	360
Показания индикатора усилителя в отн. ед.					
Нормированные значения поляризационной хар-ки					

6.7 Измерить коэффициент усиления плоской спиральной антенной решетки абсолютным методом

Собрать установку согласно схеме рис.1. Выставить на аттенюаторе мощности генератора максимальный уровень ослабления (порядка 22-25 дБ); выставить в горизонтальной плоскости $\theta = 0$. Вращением измерительного рупора, добиться максимального показания индикатора усилителя. Записать показания аттенюатора мощности генератора $G_{4-80} N_{II}$. Отсоединить плоскую передающую антенну от генератора и подключить к генератору коаксиально-волноводный переход. Детекторную секцию 4 (рис. 1) отключить от выхода приемной рупорной антенны на поворотном устройстве и подключить к генератору коаксиально-волноводный переход. При этом показания индикатора измерительного усилителя резко возрастают. Регулировкой аттенюатора мощности генератора установить стрелку индикатора измерительного

усилителя на уровень, соответствующий предыдущему измерению. При этом записать показания аттенюатора генератора $N_{пер}$ в дБ в таблицу 4.

Таблица 4

N_{II}	N_{IIEP}	$4\pi r/\lambda$	G	$G, \text{дБ}$

Здесь r - расстояние между передающей и приемной антеннами ($r \approx 70 \dots 100$ см.), λ - длина волны (определяется через частоту, выставленную на генераторе).

Определение значения искомого коэффициента усиления G в размах производится по формуле:

$$G = \frac{1}{G_{iD}} \left[\frac{4\pi r}{\lambda} \right]^2 10^{\frac{N_I - N_{iAD}}{10}}$$

Здесь значение G_{iD} зависит от конструкции приемной антенны и для рупорной антенны вычисляется по формуле:

$$G_{iD} = 4\pi(0,65S) / (\lambda^2),$$

где S – площадь раскрытия приемной рупорной антенны.

Коэффициент усиления антенны в децибелах определяется соотношением:

$$G_{дБ} = 20 \lg \left[\frac{4\pi r}{\lambda} \right] + [N_I - N_{iAD}] - 10 \lg G_{iD}.$$

Результаты расчета коэффициента усиления исследуемой антенны занести в таблицу 4.

7. Измерение входного сопротивления антенны

Установить на генераторе частоту, при которой осуществляется максимальное излучение.

Собрать установку, согласно рис.2.

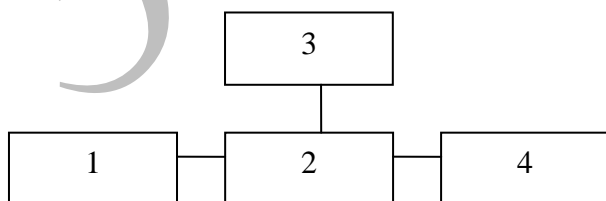


Рис.2. Структурная схема настройки измерительной линии:

1. Генератор СВЧ (ГЧ-81, ГЧ-80)
2. Измерительная линия (Р1-36)
3. Индикатор (У2-8, В3-38)
4. Короткозамыкатель

С помощью перемещения индикаторной головки по вертикали и горизонтали, настроить измерительную линию на максимальное показание шкалы индикатора.

После этого отсоединить короткозамыкатель и присоединить к измерительной линии исследуемую антенну, согласно Рис.2.

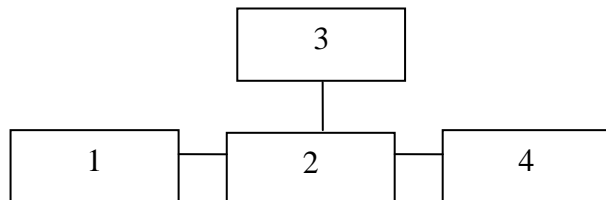


Рис.3. Структурная схема измерительной установки:

1. Генератор СВЧ (ГЧ-81, ГЧ-80)
2. Измерительная линия (Р1-36)
3. Индикатор (У2-8, ВЗ-38)
4. Измеряемая антенна

Затем нужно снять кривую распределения напряжения вдоль фидера измерительной линии, которая примерно будет иметь вид, показанный на рис.4.

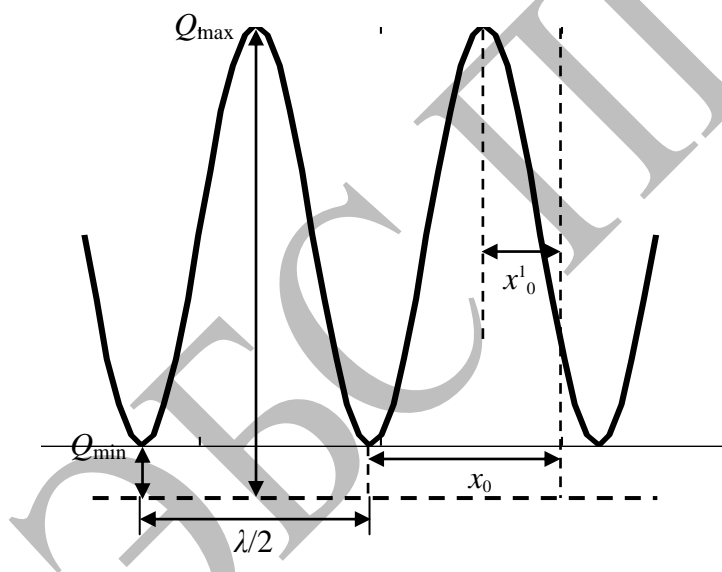


Рис.4. Примерный вид распределения напряжения вдоль фидерной линии

Для вычисления входного сопротивления антенны сначала определяется коэффициент бегущей волны K , который равен отношению ближайшего к антенне минимального значения напряжения (минимальное показание стрелки индикатора) к максимальному значению стрелки индикатора (максимальное значение стрелки индикатора).

$$K = \frac{U_{i \text{ à èñ}}}{U_{i \text{ èí}}} .$$

Затем находится длина волны в тракте λ , которая равна удвоенному расстоянию между двумя минимумами (или максимумами) показаний стрелки индикатора.

Следующим пунктом измерения находится ближайший максимум напряжения со стороны антенны x_0^1 . (Внимание. Нужно учесть случай, если отсчет начинается не от нуля.) Затем находится расстояние до ближайшего минимума кривой напряжений x_0 (см. рис.3).

По формуле

$$Z_{\text{вв}(\delta)} = \rho \cdot \frac{\hat{E} + 0,5i \cdot (1 - K^2) \cdot \text{Sin}2\psi}{\text{Cos}^2\psi + K^2 \cdot \text{Sin}^2\psi},$$

где

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda}(x - x_0); \quad i^2 = -1,$$

можно найти входное сопротивление как функцию от координаты x .

При $x=0, x^1=x_0$,

$$Z_{\Delta} = R_{\Delta} + iX_{\Delta} = \rho \cdot \frac{\hat{E} - 0,5i \cdot (1 - K^2) \cdot \text{Sin}(2\psi_1 \cdot x_0)}{K^2 \cdot \text{Sin}^2(\psi_1 \cdot x_0) + \text{Cos}^2(\psi_1 \cdot x_0)},$$

где

$$\psi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \rho = 50 \text{ Ом.}$$

8. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- Наименование работы;
- Цель работы;
- Основные расчетные формулы;
- Функциональные схемы измерений;
- Результаты расчета и эксперимента (в виде таблиц и графиков);
- Выводы

Приложение 1. Основные параметры антенн и характеристики рупорных антенн

Основными характеристиками, определяющими свойства антенно-фидерного устройства, являются:

1. Характеристика направленности $\vec{F}(\theta, \varphi)$, которая является одной из важнейших характеристик антенны, полностью определяющая условие распределения и все поляризационные и фазовые свойства излучаемого (принимаемого) электромагнитного поля в дальней зоне антенны. В самом общем случае векторная комплексная характеристика направленности состоит из произведения трёх сомножителей:

$$\vec{F}(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi) \cdot \vec{P}(\theta, \varphi) \cdot \exp[j\Phi(\theta, \varphi)], \quad (1)$$

описывающих соответственно амплитудную, поляризационную и фазовую структуру дальнего поля антенны.

Амплитудную характеристику направленности поля в дальней зоне можно найти по формулам:

$$F_{\theta}(\theta, \varphi) \frac{E_{\theta}(\theta, \varphi)}{|E_{\theta}(\theta_1, \varphi_1)|}; \quad F_{\varphi}(\theta, \varphi) \frac{E_{\varphi}(\theta, \varphi)}{|E_{\varphi}(\theta_1, \varphi_1)|}; \quad (2)$$

где θ_1, φ_1 и θ_2, φ_2 представляют собой направления максимального излучения напряженности электрического поля E для единичных компонент сферической системы координат \vec{i}_{φ} и \vec{i}_{θ} .

На плоскости диаграмму направленности можно изображать в трех видах, как показано на ниже приведенных рисунках. На рис.4 показана система координат в которой изображается поляризационная характеристика .

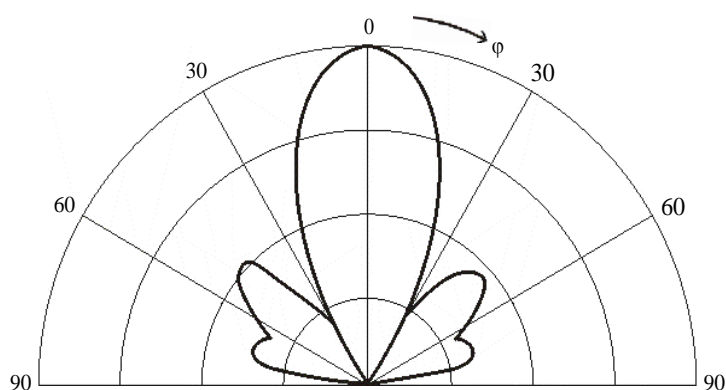


Рис.1. Пример диаграммы направленности в полярной системе координат

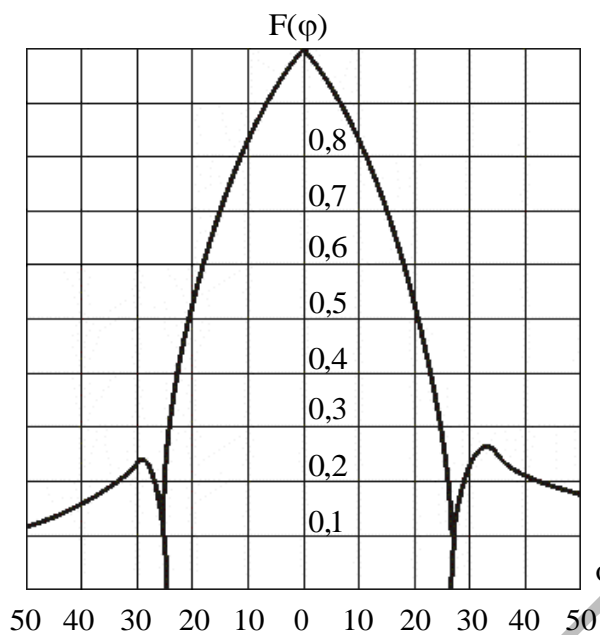


Рис.2. Пример диаграммы направленности в прямоугольной системе координат с линейным масштабом по оси ординат

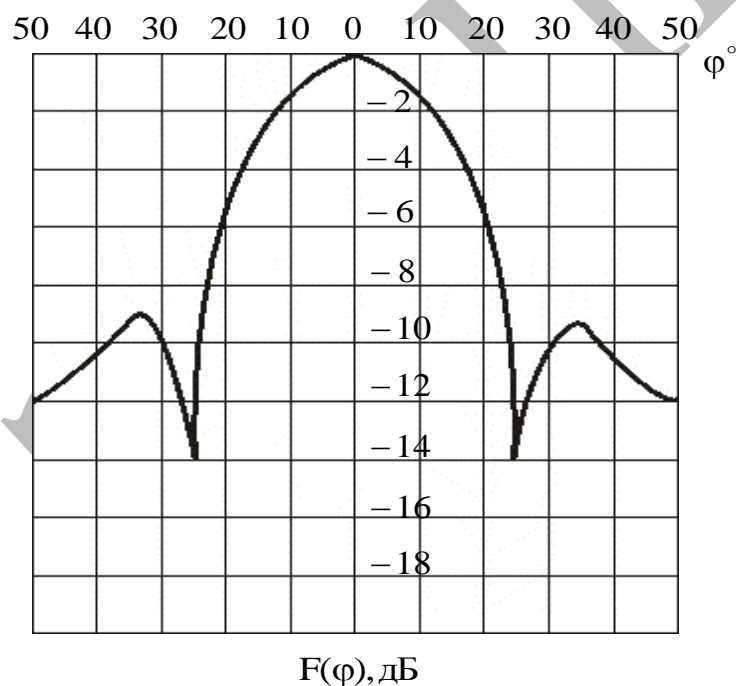


Рис.3. Пример диаграммы направленности в прямоугольной системе координат с логарифмическим масштабом по оси ординат

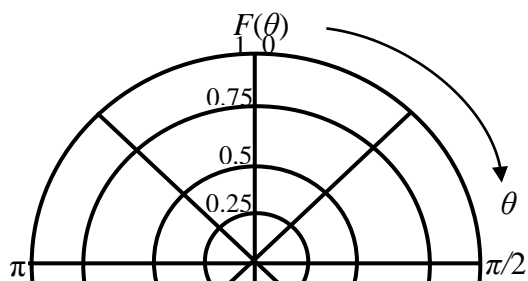


Рис.4. Система координат для изображения поляризационной характеристики

2. Коэффициент направленного действия (КНД) характеризует степень концентрации излучаемой мощности в данном направлении. Существует следующее определение КНД: КНД антенны показывает, во сколько раз должна быть увеличена излучаемая мощность при замене направленной антенны на гипотетическую изотропную антенну ($F^2(\theta, \varphi) = 1$), при условии сохранения величины модуля вектора Пойтинга в точке приёма. Численно максимальный КНД можно подсчитать по формуле:

$$D_{max} = \frac{4\pi}{\int_{\Omega=4\pi} F^2(\theta, \varphi) d\Omega}, \quad (3)$$

где Ω – телесный угол, $d\Omega = d\theta d\varphi$.

Коэффициент усиления (КУ). Коэффициент усиления G связан с КНД соотношением:

$$G = D_{max} \eta, \quad (4)$$

где η – коэффициент полезного действия антенны (КПД).

Коэффициент усиления показывает, во сколько раз должна быть увеличена входная мощность при замене реальной направленной антенны с потерями на абсолютно ненаправленную гипотетическую антенну без потерь при условии сохранения постоянной величины модуля вектора Пойтинга в точке наблюдения.

3. Ширина главного лепестка диаграммы направленности. Помимо КНД, направленные свойства антенны оценивают также по величине угла раствора главного лепестка характеристики направленности, в какой-нибудь плоскости на уровне половинной мощности (уровень 0,707 по полю или -3 дБ)

относительно главного максимума излучения. Величину этого угла называют шириной диаграммы направленности ($2\Delta\theta$).

По ширине диаграммы направленности можно провести грубую оценку коэффициента усиления антенны:

$$G = \frac{(32000 \dots 36000)}{2\Delta\theta^\circ \Delta\varphi^\circ}, \quad (5)$$

где под $2\Delta\theta^\circ$ и $\Delta\varphi^\circ$ понимаются значения ширины главного лепестка реальной диаграммы направленности на уровне половинной мощности.

Для рупорной антенны $\Delta\varphi^\circ = 2\Delta\theta^\circ$, а $2\Delta\theta^\circ$ - ширина главного лепестка диаграммы направленности.

Рупорная антенна относится к апертурным антеннам, т.е. к таким, у которых в соответствии с теоремой эквивалентности может быть выделена плоская поверхность раскрыва A , формирующая остронаправленное излучение. Простейшей рупорной антенной является антенна в виде открытого конца прямоугольного или круглого волновода.

Рассмотрим излучение из открытого прямоугольного волновода. Распространяющаяся волна H_{10} , дойдя до открытого конца, частично отображается обратно, а частично излучается.

Коэффициент отражения Γ от открытого конца волновода можно найти по формуле:

$$\tilde{A} = \frac{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} - 1}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} + 1}$$

Диаграмма направленности в плоскости E записывается в виде:

$$F_E(\theta) = \left[1 + \frac{1-\Gamma}{1+\Gamma} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \cos\theta \right] \frac{\sin\left[\frac{kb}{2} \sin\theta\right]}{\frac{kb}{2} \sin\theta}, \quad (6)$$

а в плоскости H :

$$F_H(\theta) = \left[\cos\theta + \frac{1-\Gamma}{1+\Gamma} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \right] \frac{\cos\left[\frac{ka}{2} \sin\theta\right]}{\left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2 - \sin^2\theta}. \quad (7)$$

В формулах (6) и (7) a и b внутренние размеры широкой и узкой стенок волновода, соответственно, λ - длина волны в вакууме, угол θ отсчитывается от оси Z . Диаграмма направленности отсчитывается от 0° до 90° , а затем строится симметрично с другой стороны от 0° до -90° .

Но антенны в виде открытого конца волновода обладают плохой направленностью и поэтому используются H - секторальные, E – секторальные, а чаще всего пирамидальные рупора (см. рис.5).

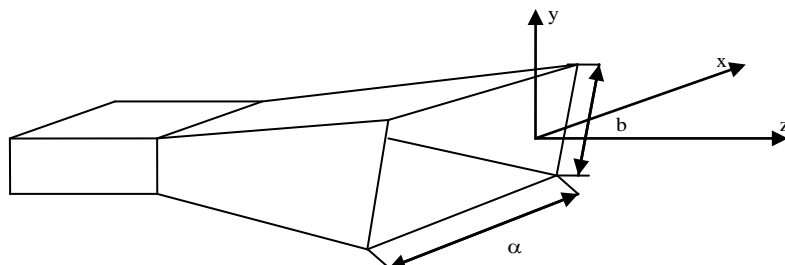


Рис.5. Пирамидальный рупор

Диаграмма направленности пирамидального рупора в H – плоскости может быть рассчитана по формуле:

$$F_H(\theta) = \left[\cos \theta + \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2} \right] \frac{\cos \left[\frac{ka}{2} \sin \theta \right]}{\left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 - \sin^2 \theta}, \quad (8)$$

где a и b – размеры раскрыва рупора.

Если угол раскрыва рупора α не мал, то фронт волны в раскрыве заметно отличается от плоского и это вызовет расширение диаграммы направленности. Фаза поля на краю раскрыва по отношению к ее значению в середине раскрыва может быть определена по приближенной формуле:

$$\hat{O}_2 \approx -\frac{\pi a^2}{4\lambda R} = -\frac{\pi a}{2\lambda} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

где R – длина рупора.

Помимо рупоров прямоугольного поперечного сечения находят также применение рупоры круглого сечения, а именно конические рупоры. Такие рупоры образуются путем расширения открытого конца круглого волновода, возбуждаемого волной H_{11} . Излучение конического рупора аналогично излучению пирамидального рупора.

Достоинствами рупорных антенн являются простота конструкции и хорошие диапазонные свойства. Практически любой рупор может использоваться во всей рабочей полосе частот питающего волновода ($a < \lambda < 2a$). Самостоятельно рупорные антенны чаще всего применяются в измерительных установках, например, как эталонные антенны с известной величиной КНД. Кроме того, они широко используются для облучения зеркальных и линзовых антенн.

К недостаткам рупорных антенн следует отнести их относительно большие габариты.

Приложение 2. Основные характеристики спиральных антенн

Характеристика направленности антенн $\vec{F}(\theta, \phi)$ является основной характеристикой любого вида антенн. Существует четыре основных вида характеристик направленности – они показаны на рис.1.

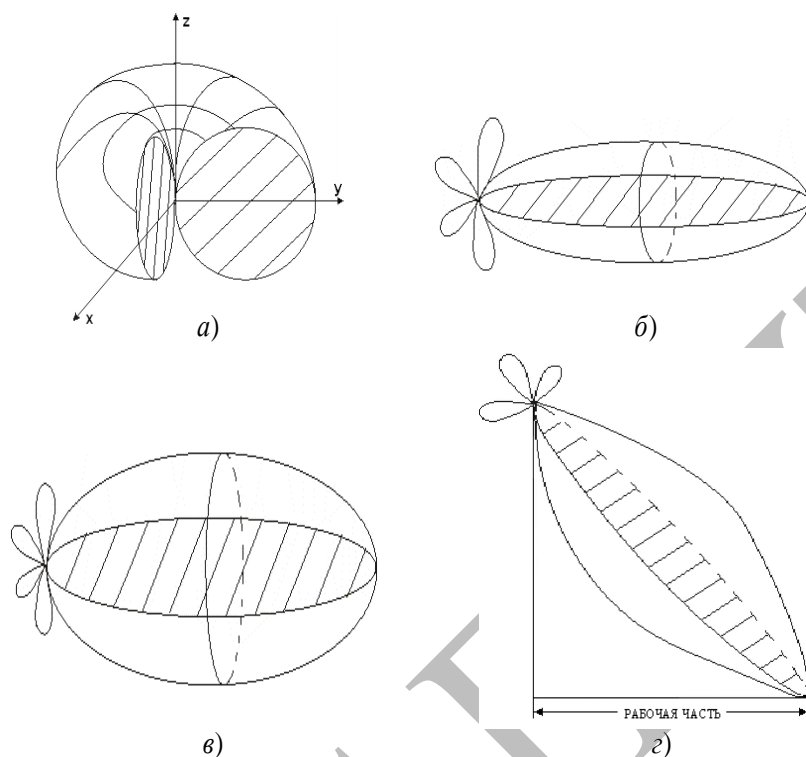


Рис.1. Виды характеристик направленности: а) - тороидальная; б) - игольчатая; в) - всемерная; г) - косекансная

Более подробно о характеристике направленности см. в [1,7] и в приложении 1.

Коэффициент направленного действия (КНД) и коэффициент усиления спиральной антенны определяются по формулам (5) - (7) приложения 1.

Важной характеристикой антенны является *поляризационная характеристика*.

В общем случае в дальней зоне вектор напряженности электрического поля \vec{E} описывает эллипс.

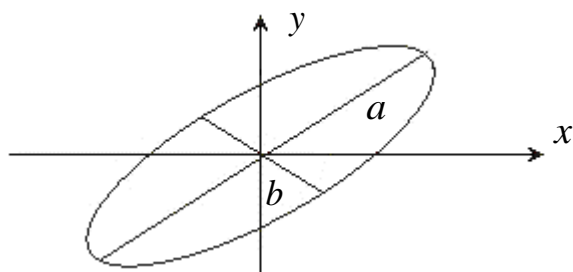


Рис.2. Эллипс поляризации

В общем случае этот эллипс описывается формулой:

$$\left(\frac{E_y(t)}{|B_1|}\right)^2 - 2\frac{E_y(t)E_x(t)}{|B_1||A_1|}\cos\varphi + \left(\frac{E_x(t)}{|A_1|}\right)^2 = e^{-2\alpha x}\sin^2\varphi, \quad (1)$$

где E_x и E_y – составляющие напряженности электрического поля \vec{E} ; A_1 и B_1 – постоянные; α – коэффициент затухания; φ – разность фаз.

В частных случаях может иметь место линейная или круговая поляризация. Рупорная антенна имеет линейную поляризацию, а спиральная эллиптическую, или при определенном подборе размеров витка – круговую. Коэффициент эллиптичности m равен отношению малой b и большой a полуосей эллипса (см. рис.2):

$$m = \frac{b}{a}$$

Цилиндрическая спиральная антенна, работающая в режиме осевого излучения, относится к классу антенн бегущих волн с вращающейся поляризацией. Конструктивно она состоит из проволочной спирали 1 и плоского металлического экрана 2 (рис.3.). Питание антенны производится коаксиальным фидером, наружный проводник 3 которого присоединяется к экрану 2, а внутренний проводник 4 – к проводу спирали.

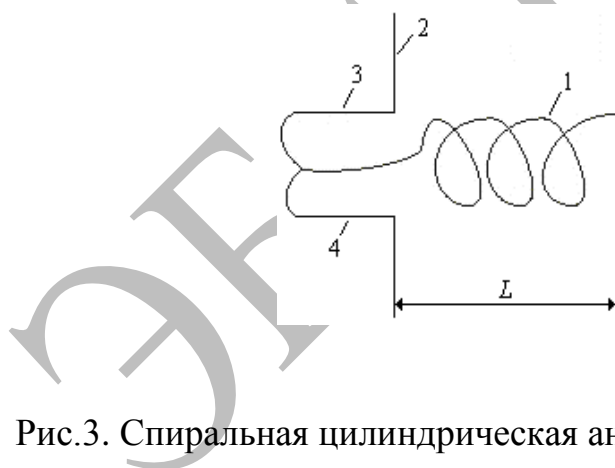


Рис.3. Спиральная цилиндрическая антенна

В зависимости от соотношения между длиной волны λ и длиной витка l возможны 3 режима работы антенны: режим бокового излучения ($\lambda > 2l$); режим осевого излучения ($\lambda \approx l$); режим конического излучения ($\lambda < 0,5l$). На рис.4 показаны эти виды излучения.

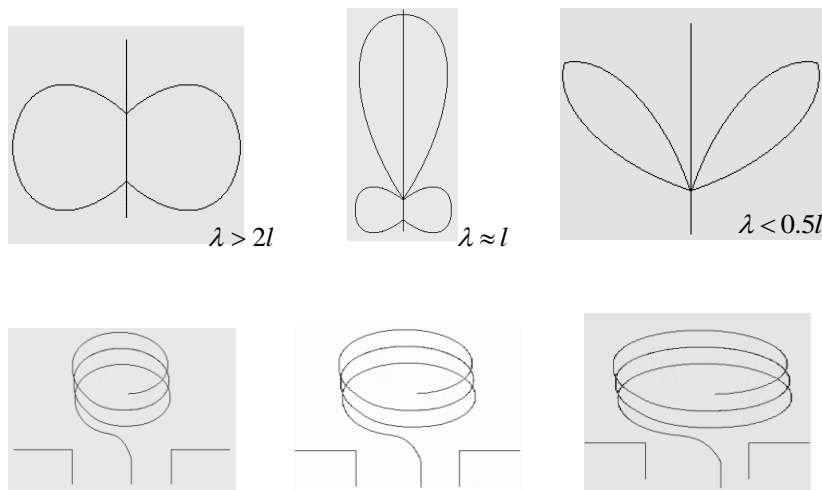


Рис.4. Виды излучения спиральной цилиндрической антенны

В настоящей работе рассматривается режим осевого излучения, когда вдоль каждого витка спирали укладывается одна длина волны. Фазовая скорость (v_ϕ) в этом режиме меньше скорости света (c). Коэффициент замедления рассчитывается по формуле:

$$\xi = \frac{\tilde{n}}{v_\phi}$$

Диаграмму направленности по полю спиральной антенны можно рассчитать по формуле

$$F(\theta) = F_1(\theta)F_c(\theta). \quad (2)$$

В формуле (15) введены обозначения

$$F_1(\theta) = [J_{n-1}(kr \sin \theta) + J_{n+1}(kr \sin \theta)] \cos \theta,$$

ДН одного витка, где $J_{n\pm 1}(x)$ -функция Бесселя первого рода, r - радиус одного витка.

Если цилиндрическую спиральную антенну рассматривать как антенную решетку с числом элементов равным количеству витков, то множитель решетки имеет вид

$$F(\theta) = \frac{\sin \left[\frac{Nk}{2} (\xi \cdot l - s \cos \theta) \right]}{N \sin \left[\frac{k}{2} (\xi \cdot l - s \cos \theta) \right]},$$

где k - волновое число, $k = 2\pi / \lambda$;
 N - количество витков спирали;
 θ - угловая координата точки наблюдения, отсчитываемая от оси спирали;
 s - шаг намотки спирали;
 ξ - коэффициент замедления, $\xi = \pi D / S$;
 D –диаметр спирали.

Поскольку спиральная антенна, работающая в режиме осевого излучения, относится к типу антенн с бегущей волной, то коэффициент направленного действия (КНД) в направлении оси достигает максимального значения при условии, что разность фаз между волнами, излученными последним и первым витками у конца антенны равна π . Поскольку каждый виток спирали имеет некоторый шаг намотки s , то фазовый набег волны на одном витке для получения максимального КНД должен быть равен:

$$\Phi = k\xi l - kS = 2\pi + \pi / N ,$$

где k - волновое число;
 S - шаг намотки спирали;
 l - длина витка.

При этом длина витка должна удовлетворять равенству:

$$l = \frac{S + \lambda + \lambda / 2N}{\xi} . \quad (3)$$

Для получения в направлении оси спирали излучаемого поля с круговой поляризацией, набег по фазе волн на одном витке должен быть равен 2π , при этом должно соблюдаться следующее условие:

$$k\xi l - kS = 2\pi .$$

Отсюда длина витка при круговой поляризации получается равной:

$$l = \frac{S + \lambda}{\xi} . \quad (4)$$

Таким образом, при соблюдении условия (4) в направлении оси спирали получается точно круговая поляризация, а при соблюдении условия (3) – максимальный КНД при некоторой эллиптичности поляризации. На основании экспериментальных данных были получены следующие эмпирические формулы для расчета спиральных антенн с углом подъема витка $\alpha = 12 - 16^\circ$ при числе витков $5 \leq n \leq 14$. Ширина луча по половинной мощности

$$\Delta\theta = \frac{52^\circ \lambda}{l \sqrt{\frac{ns}{\lambda}}},$$

КНД (D) в направлении оси спирали

$$D = 7.5 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 \frac{ns}{\lambda}.$$

Входное сопротивление можно посчитать по формуле

$$R_{\lambda 0} \approx 140 \frac{l}{\lambda}, \text{ Ом.}$$

Вследствие того, что коэффициент замедления фазовой скорости ξ с увеличением длины волны некоторых пределах увеличивается, соотношения (3) или (4) с изменением длины волны мало нарушаются поэтому спиральная антенна в довольно широком диапазоне волн сохраняет свои направленные свойства. Этот диапазон волн простирается примерно от $0.7\lambda_0$ до $1.2\lambda_0$, где λ_0 – длина волны, для которой подобраны оптимальные размеры антенны.

Кроме цилиндрических спиральных антенн, применяются также более широкополосные конические спиральные антенны.

Спиральные антенны находят широкое применение в диапазоне сантиметровых и дециметровых волн для получения поля с круговой поляризацией. А также, наряду с самостоятельным применением часто используются в качестве элементов сканирующих и синфазных антенных решеток (с круговой поляризацией излучения).

Приложение 3. Основные характеристики и формулы для расчета диаграммы направленности плоских спиральных антенн

Среди различных типов широкополостных антенн важное место занимают разнообразные спиральные антенны (рисунок 1). Спиральные антенны являются слабо- и средненаправленными антеннами эллиптической поляризации. Они применяются в качестве самостоятельных антенн, возбуждателей волноводнорупорных антенн эллиптической 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 спиральные антенны, у которых геометрические параметры (шаг, радиус, диаметр провода) постоянны по все длине и широкополостность обусловлена наличием дисперсии фазовой скорости (рис.1),

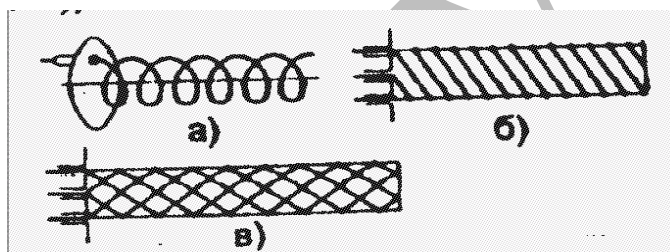


Рис. 1. Цилиндрические регулярные спиральные антенны:

а) однозаходовая с односторонней намоткой; б) многозаходовая (4-х заходовая) с односторонней намоткой; в) – многозаходовая с двусторонней намоткой

- эквиугловые или частотно-независимые (рис.2),
- нерегулярные, к которым можно отнести все остальные типы спиральных антенн (рис. 3).

Плоские спиральные антенны (рис.3 а) принимают и излучают поля с вращающейся поляризацией в широком диапазоне частот. Так как плоские спиральные антенны слабо направленные, чаще всего их используют в составе антенных решеток (АР).

Плоские спиральные антенны, имеющие небольшие габариты, применяются для невыступающих конструкций, а также в качестве самостоятельных антенн, облучателей линзовых и зеркальных антенн.

Плоские спиральные используются в диапазоне частот 0.2...18 ГГц. Для частот более 2 ГГц их изготавливают по интегральной технологии. Это позволяет миниатюзировать антенны и унифицировать их основные узлы.

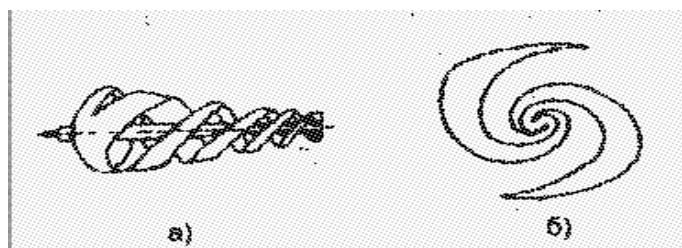


Рис. 2. Эквиугловые спиральные антенны:
а) – коническая; б) - плоская

Преимуществом печатных спиралей и антенных решеток – это малые габаритные размеры, масса и стоимость при высокой точности изготовления и воспроизводимости основных характеристик, а также возможность их работы при малых и средних уровнях мощности.

Конструктивными особенностями печатных спиральных антенн и АР на их основе является полосковая структура, наличие слоистой среды, включая диэлектрическую подложку и покрытие решетки, и различные способы их возбуждения, реализуемые с помощью коаксиальных или полосковых линий и переходов. Для печатных спиралей требуется одностороннее излучение, которое получают размещая спиральную плату в резонаторе или над экраном. Плата состоит из полосковых проводников спирали на диэлектрической подложке. Обычно печатные спирали имеют две ветви, которые возбуждаются линией передачи.

В зависимости от способа возбуждения спирали, они могут работать в режиме осевого и ненаправленного излучений. Режим осевого излучения – основной и он возникает при противофазном возбуждении ветвей спирали (см. приложение 2). Причем главный лепесток ДН направлен по нормали к плоскости спирали. При синфазном возбуждении спирали имеем режим ненаправленного излучения воронкообразной ДН.

Главным достоинством плоских спиральных антенн (спиралей Архимеда) рис. 3 а, кроме перечисленных выше являются: плоская структура (малые габариты); излучение поля с вращающейся поляризацией; частотная независимость параметров антенны.

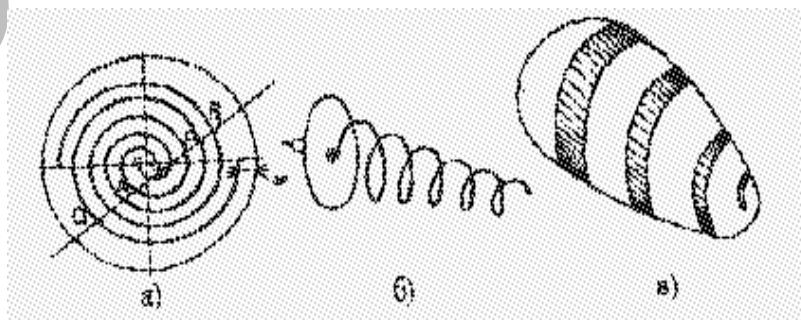


Рис. 3. Нерегулярные спиральная антенны :

а) – плоская спиральная антенна с постоянным шагом намотки спираль Архимеда); б) коническая с постоянным шагом намотки; в) спиральная антенна на поверхности эллипсоида вращения с постоянным углом намотки

Рабочая полоса любой антенны определяется степенью постоянства на частоте двух главных параметров:

- а) формы характеристики направленности (имеется в виду сохранение направления максимального излучения, ширины луча, величины КПД и т.д.);
- б) входного коэффициента отражения

$$|\tilde{A}_{\text{вх}}(\omega)| = \frac{|z_{\text{вх}}(\omega) - 1|}{|z_{\text{вх}}(\omega) + 1|} < \tilde{A}_{\text{вх}} , \quad (1)$$

где $\Gamma_{\text{доп}}$ – допустимое значение коэффициента отражения и $z_{\text{вх}}(\omega)$ – нормированный входной импеданс.

Уменьшить частотную зависимость входного коэффициента отражения передающих СВЧ антенн можно с помощью включаемых на входе независимых вентильных устройств на основе подмагниченных ферритов. Но этот способ согласования имеет ряд недостатков, среди которых наиболее существенным является снижение К,П,Д, и невозможность работы антенн в режиме приема-передачи. Поэтому основным способом решения проблемы согласования входа антенны является использование излучателей с мало меняющимся входным импедансом в необходимой полосе частот. Одним из таких видов излучателей является плоская спиральная антенна.

Плоская спиральная антенна (спираль Архимеда). Двухзаходная спираль Архимеда и основные ее свойства.

Замечательной особенностью, как плоских, так и пространственных эквиугловых спиральных структур является своеобразная автоматическая «отсечка» излучающих токов. Это явление стоит в том, что амплитуды токов, возникающих в плечах спирали под действием генератора, включаемого в центре структуры, резко уменьшается (в 100 раз и более) после прохождения тока витка спирали, периметр которого примерно равен длине волны. Остающаяся невозбужденной внешняя часть структуры может быть обрезана, и это почти не сказывается на характеристике излучения и входном импедансе остающейся части. Явление отсечки токов впервые было обнаружено экспериментально и в последствии подтверждено с помощью электродинамических расчетов.

Благодаря отсечке токов в излучении эквиугловой спиральной структуры конечных размеров участвует только центральная часть с диаметром, примерно равным одной трети длины волны (так называемая активная область).

При создании плоских спиральных эквиугловых структур, определенное значение имеет также еще одно обстоятельство, связанное с принципом

двойственности. Дело в том, что плоская структура, определяемая угловыми размерами, может одновременно трактоваться и как электрическая, и как магнитная излучающая система. Обозначим абсолютный импеданс структуры через z_1 и заметим, что согласно принципу двойственности при взаимной замене металлической и магнитной частей структуры ее импеданс изменяется и принимает величину z_2 , определяемую формулой:

$$z_2 = W_0^2 \frac{1}{4z_1} = \frac{(60\pi)^2}{z_1} . \quad (2)$$

При совпадении форм электрической и дополнительной магнитной частей структуры имеет место равенство $Z_1 = Z_2$ и входной импеданс структуры оказывается равным $Z_1 = Z_2 = 60\pi$ на любой частоте.

Итак, можно сформулировать следующие принципы создания частотно-независимых антенн:

1) антенне должно выполняться условие автоматической отсечки излучающих токов, гарантирующее постоянство электрического размера излучающей части антенны (принцип отсечки токов);

2) форма антенны должна определяться в основном угловыми размерами (угловой принцип);

3) форма магнитной части плоской антенны должна совпадать с формой вибраторной части (принцип дополненности, рис.3) .

Среди этих принципов первостепенное значение принадлежит принципу отсечки токов. Второй и третий принципы имеют вспомогательное значение, и их нарушение в реальных конструкциях антенн не обязательно приводит к заметному ухудшению частотных свойств.

Плечи плоской двухзаходной спирали Архимеда описываются уравнениями:

$$\rho_1(\phi) = a\phi + b; \quad \rho_2(\phi) = a(\phi - \pi) + b, \quad (3)$$

где a и b – постоянные величины; ρ, ϕ - полярные координаты.

Антенны выполняются в виде двух проводников (рис. 3 а), которые, в частности, могут иметь плоскую форму и выполняться печатным способом на тонком листе высококачественного диэлектрика. Расстояние между проводниками $\square \rho$ и ширина проводников \square постоянны по углу ϕ , причем обычно расстояние между проводниками берется равным ширине проводников (принцип дополненности). Возможны два режима возбуждения антенны: противофазный и синфазный. В противофазном режиме начальные точки спиралей А и В (рис. 3 а) присоединяются к двухпроводному фидеру или же возбуждаются коаксиальным кабелем, проложенным вдоль одного из плеч. В синфазном режиме возбуждения начальные точки спиралей А и В замыкаются между собой и присоединяются к внутреннему проводнику коаксиального кабеля. Наружный проводник кабеля присоединяется к противовесу, представляющему собой плоскую металлическую шайбу.

Рассмотрим физическую картинку излучения Архимедовских спиральных антенн. В первом приближении антенну можно рассматривать как двухпроводную линию, свернутую в спираль. Предположим, что на каждом проводнике спирали имеется бегущая волна тока, причем расстояние между проводниками $\Delta\rho$ много меньше длины волны λ . Выясним фазовые соотношения токов в проводниках спирали при двух режимах возбуждения.

Противофазное возбуждение. Пусть в начальных точках спирали А и В (рис. 3 а) фазы токов равны $\Phi_A=\pi$ и $\Phi_B=0$. выделим две точки А и В. Запаздывание фазы в этих точках по отношению к А и В одинаково и равно kl , и следовательно, фазы токов точек Р и Q будут следующими:

$$\hat{O}_P = -kl + \pi; \quad \hat{O}_Q = -kl, \quad (4)$$

где $k=2\pi/\lambda$ (волновое число) и l – длина проводника спирали между точками А и Р или В и Q. Пусть точки Р и Q лежат на окружности радиуса ρ . Дополнительное запаздывание фазы в точке Р' по отношению к точке Q при $\Delta\rho \ll \lambda$ приближенно будет равно $-\pi k\rho$, и следовательно, фаза тока в точке Р' окажется равной $\hat{O}_{P'} = -kl - \pi k\rho$. Разность фаз токов $\Delta\hat{O}$ в соседних проводниках спирали в точках Р' и Р будет равна:

$$\Delta\hat{O} = \hat{O}_{P'} - \hat{O}_P = \pi k\rho + \pi. \quad (5)$$

Найдем значения радиусов ρ_n , при которых $\Delta\hat{O} \in 2\pi n$, где $n = 1, 2, \dots$ и токи в соседних проводниках в точках Р и Р' синфазны. Соответствующее условие имеет вид:

$$2\pi\rho_n = (2n-1)\lambda; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

Как следует из (6), на окружностях с периметром, равным нечетному числу длин волн, токи в соседних проводниках спирали находятся в фазе и могут интенсивно излучать электромагнитные волны. Наибольшую интенсивность имеет излучение токов в районе окружности с радиусом $\rho_n = \lambda/2\pi$, причем после прохождения витков с таким радиусом токи в проводниках спиральной линии резко уменьшаются. Последующие витки спирали, для которых условие синфазности (6) выполняется при $n = 2, 3, \dots$, практически оказываются невозбужденными и не оказывают влияния на работу антенны.

Таким образом, активная область плоской архимедовой спиральной антенны в режиме противофазного возбуждения условно может быть заменена одним витком радиусом $\rho_1 = \lambda/2\pi$ с распределением эквивалентного тока по закону бегущей волны :

$$I_\phi(\varphi) = I_0 \exp(-jk\rho_1\varphi) = I_0 \exp(-j\varphi). \quad (7)$$

Периметр этого эквивалентного витка равен длине волны.

Поскольку приведенные рассуждения справедливы для любой длины волны λ , то противофазная спиральная антенна будет частотно - независимой как по входному импедансу, так и по характеристике направленности, если

только рабочая частота превышает некоторое граничное значение, зависящее от наружного диаметра антенны.

Синфазное возбуждение. Рассматривая таким же образом фазовые отношения токов в проводниках спирали при синфазном возбуждении, можно легко установить, что токи в соседних витках будут в фазе на окружностях с радиусами ρ_m , удовлетворяющими условию:

$$2\pi\rho_m = 2m\lambda, \quad m=1,2,3\dots \quad (8)$$

из-за интенсивного излучения токов в районе окружности с радиусом $\rho_{1n} = \lambda / \pi$ происходит автоматическая отсечка токов и витки с радиусом $\rho > \rho_{1c}$ оказываются невозбужденными.

Таким образом, активная область плоской архимедовой спиральной антенны в режиме синфазного возбуждения условно может быть заменена одним витком радиусом $\rho_{1n} = \lambda / \pi$ с распределением эквивалентного электрического тока по закону бегущей волны:

$$I_{\varphi c}^y(\varphi) = I_0 \exp(-jk\rho_{1c}\varphi) = I_0 \exp(-j2\varphi). \quad (9)$$

Характеристики направленности архимедовских спиральных антенн

При расчете характеристик направленности спиральных антенн удобно расположить архимедовскую спиральную антенну в экваториальной плоскости сферической системы координат (начало координат совпадает с центром спирали). Тогда, предполагая, что излучение антенны обусловлено распределением сторонних токов (7) или (9) и основываясь на методике расчета полей [1,6], можно получить следующие формулы для расчета характеристик направленности:

$$\left. \begin{aligned} E_{\theta}(\theta, \varphi) &= jA \left[\begin{array}{l} J_{n-1}(n \sin \theta) + \\ J_{n+1}(n \sin \theta) \end{array} \right] \cos \theta \exp(-jn\varphi); \\ E_{\varphi}(\theta, \varphi) &= A \left[\begin{array}{l} J_{n-1}(n \sin \theta) - \\ J_{n+1}(n \sin \theta) \end{array} \right] \exp(-jn\varphi). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В этих формулах A представляет собой амплитудную константу, $J_{n\pm 1}(x)$ -функции Бесселя, причем $n = 1$ относится к случаю противофазного возбуждения спирали и $n = 2$ – к случаю синфазного возбуждения.

Отметим, что составляющая поля E_{φ} всегда больше составляющей E_{θ} . Исключение составляет лишь случай $\theta = 0$ (или π) при $n = 1$, когда эти составляющие равны. Кроме того, как следует из формул (10), составляющие поля находятся в фазовой квадратуре. Поэтому полное поле излучения архимедовских спиральных антенн имеет преимущественно эллиптическую поляризацию. Однако в плоскости спирали меридиональная составляющая E_{θ} всегда обращается в нуль и получается линейно-поляризованное поле.

Чисто круговая поляризация возникает в направлении $\theta = 0$ (или π) при противофазном возбуждении спирали. При синфазном возбуждении спирали излучение вдоль оси z (перпендикулярно плоскости спирали) отсутствует.

Амплитудная характеристика диаграммы направленности (при $\varphi = 0$) выражается формулой:

$$F(\theta) = \sqrt{\frac{|E_\theta|^2 + |E_\varphi|^2}{\left\{ |E_\theta|^2 + |E_\varphi|^2 \right\}_{i \lambda \delta \tilde{n}}}}$$

Для противофазного излучения предыдущая формула примет вид:

$$F(\theta) = [J_0(\sin\theta) + J_2(\sin\theta)] \sqrt{\frac{1 + \cos^2\theta}{2}}. \quad (11)$$

В большинстве применений двунаправленная характеристика излучения (в верхнее и нижнее полупространство) нежелательна. Поэтому с нижней стороны спирали располагают металлический экран. Однако наличие экрана приводит к появлению дополнительной частотной зависимости и снижает ее диапазонность.

Спиральную антенну, в принципе, можно отнести к антеннам бегущей волны с непрерывным (периодическим в пространстве) распределением источников, однако допустимо рассматривать ее как дискретную антенну, принимая витки за отдельные элементы. Тогда характеристику направленности можно выразить формулой

$$F(\theta, \varphi) = \left| \frac{\sin \frac{Nkd(\cos\theta - \xi)}{2}}{\sin \frac{kd(\cos\theta - \xi)}{2}} \right| F_0(\theta, \varphi),$$

где k - постоянная распространения в среде; d - расстояние между спиралями; $F_0(\theta, \varphi)$ - характеристика направленности одного витка.

Постоянная распространения вдоль оси антенны находится по формуле

$$\tilde{A} = \xi k.$$

Следует отметить, что последние формулы более точны при расчете цилиндрических спиральных антенн, чем плоских спиральных антенн.

Приложение 4. Плоские линейные решетки

В ряде случаев необходимо, чтобы антенны концентрировали излучаемые волны в узкие пучки, т.е. обладали узкими ДН, большим КНД. Этого можно достичь, применив систему слабонаправленных излучателей, расположенных и возбуждаемых так, чтобы в нужном направлении поля от всех излучателей складывались синфазно или с небольшим сдвигом фаз: в других же направлениях поля должны быть несинфазными. При этом напряженность поля в требуемом направлении увеличивается за счет ее уменьшения в других направлениях. Очевидно, что данный способ получения узких ДН требует увеличения габаритных размеров антенны.

Одной из систем излучателей является антенная решетка (АР). Антенной решеткой обычно называется система расположенных на некотором расстоянии друг от друга любых идентичных излучателей, одинаково ориентированных в пространстве. В самом общем случае, однако, решетка может состоять из излучателей (элементов) различных типов, произвольно расположенных в пространстве.

Различают линейные, поверхностные (цилиндрические, сферические, канонические) и объемные решетки. Наиболее распространены плоские и прямолинейные решетки.

Прямолинейные антенные решетки широко применяются самостоятельно, кроме того, могут применяться как элементы поверхностных или объемных решеток. Прямолинейной решеткой называется система идентичных излучателей, фазовые центры, которых расположены на прямой, называемой осью решетки (рис.1). относительное расстояние d/λ между фазовыми центрами излучателей называется шагом решетки.

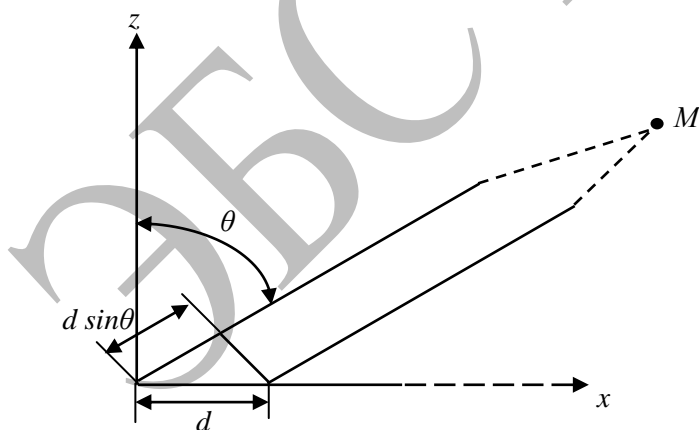


Рис. 1. Сложение поля линейных излучателей

Рассмотрим произвольную линейную решетку. Полагая, что возбуждающие токи во всех элементах решетки равны по амплитуде ($I_1 = I_2 = \dots = I_n = I$), а фаза тока в каждом последующем излучателе отстает от фазы

тока в предыдущем на величину ψ , т.е. изменяется вдоль системы излучателей по линейному закону, получаем равноамплитудную линейно-фазовую прямолинейную решетку.

Выразим напряженность поля, создаваемого каждым излучателем в точке наблюдения, находящейся в дальней зоне, через напряженность поля E_1 первого излучателя. При этом полагаем, что направления на точку наблюдения от всех излучателей можно считать параллельными (размеры решетки малы по сравнению с расстоянием до точки наблюдения) и что $|E_1| = |E_2| = \dots = |E_i|$.

Тогда

$$E_1 = E_2 e^{j(kd \sin \theta - \psi)} \dots, E_n = E_1 e^{j(n-1)(kd \sin \theta - \psi)},$$

где θ угол между нормалью к оси решетки z и направлением на точку наблюдения M ; $kd \sin \theta$ - пространственный сдвиг фаз между полями соседних излучателей; $j = \sqrt{-1}$. Обозначим напряженность поля одного излучателя E_1 .

Напряженность поля, создаваемого всеми излучателями решетки в точке наблюдения:

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = E_1 [1 + e^{j(kd \sin \theta - \psi)} + \dots + e^{j(n-1)(kd \sin \theta - \psi)}] \quad (1)$$

или

$$E = E_1 \sum_{p=1}^{p=n} e^{j(p-1)(kd \sin \theta - \psi)}. \quad (2)$$

В более общем случае, когда $I_1 \neq I_2 \neq \dots \neq I_n$ (неравноамплитудная линейно-фазовая решетка), выражение (2) примет вид:

$$E = E_1 \sum_{p=1}^{p=n} \frac{I_p}{I_1} e^{j(p-1)(kd \sin \theta - \psi)}. \quad (3)$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках (1) - геометрическая прогрессия, первый член которой равен единице, а знаменатель прогрессии $q = e^{j(kd \sin \theta - \psi)}$. Поэтому суммарная напряженность поля:

$$E = E_1 \frac{q^n - 1}{q - 1} = E_1 \frac{e^{jn(kd \sin \theta - \psi)} - 1}{e^{j(kd \sin \theta - \psi)} - 1}.$$

Вынося за скобки в числителе множитель $e^{jn(kd \sin \theta - \psi)}$, а в знаменателе $e^{j(kd \sin \theta - \psi)}$ и обозначив $kd \sin(\theta - \psi) / 2 = u$, получаем:

$$E = E_1 e^{j(n-1)u} \frac{e^{jnu} - e^{-jnu}}{e^{ju} - e^{-ju}}.$$

Применяя формулу Эйлера, получим

$$E = E_1 \frac{\left| \sin \left[\frac{n}{2} (kd \sin \theta - \psi) \right] \right|}{\left| \sin \left[\frac{1}{2} (kd \sin \theta - \psi) \right] \right|} e^{j(n-1)u} e^{-ju}, \quad (4)$$

или $E = f_1(\theta)f_c(\theta)e^{j\psi(\theta)}e^{-kr}$; где $f_1(\theta)$ - амплитудная ДН одного излучателя; $\psi(\theta)$ - фазовая характеристика направленности системы; e^{-kr} - множитель, присущий всем излучателям, учитывающий уменьшение амплитуды излучения с расстоянием; а множитель

$$f_c(\theta) = \frac{\left| \sin \left[\frac{n}{2}(kd \sin \theta - \psi) \right] \right|}{\left| \sin \left[\frac{1}{2}(kd \sin \theta - \psi) \right] \right|},$$

есть *множитель системы*, т.е. характеристика направленности линейной системы.

Благодаря знаку абсолютной величины множитель системы неотрицателен. Без абсолютной величины характеристика направленности давала бы также сведения о фазе поля системы.

Выражение $f_1(\theta)f_c(\theta)e^{j\psi(\theta)} = f(\theta)$ носит название комплексной характеристики направленности системы. Зависимость фазы напряженности поля от угла θ объясняется выбором начала отсчета. Если начало отсчета выбрать в геометрическом центре антенны, то фазовая характеристика $\psi(\theta)$ превращается в константу и множитель $e^{j(n-1)u}$ в выражении (4) может быть отброшен. Это означает, что рассматриваемая антенна излучает волну со сферическим фронтом и ее фазовый центр совпадает с геометрическим.

Тогда из (4) на определенном расстоянии, можно получить следующее выражение:

$$E = E_1 \frac{\left| \sin \left[\frac{n}{2}(kd \sin \theta - \psi) \right] \right|}{\left| \sin \left[\frac{1}{2}(kd \sin \theta - \psi) \right] \right|}. \quad (5)$$

На основании выражения (4) может быть сформулировано общее правило умножения характеристик (диаграмм) направленности: характеристика направленности системы (решетки) одностипных и одинаково ориентированных в пространстве излучателей представляет собой произведение характеристики направленности одного элемента данной системы на множитель системы. При большом числе излучателей множитель системы $f_c(\theta)$ при изменении угла θ изменяется значительно быстрее, чем множитель $f_1(\theta)$. Поэтому ДН решетки в основном определяется множителем системы.

Если излучатели антенной решетки (АР) являются ненаправленными (данной плоскости), то $f_1(\theta) = const$ и характеристика направленности АР определяется только множителем системы. ДН решетки имеет многолепестковый характер.

Синфазная антенная решетка

Широкое практическое применение находят АР с одинаковыми по амплитуде фазе тока в однородных решетках.

Полагая в (5) $\psi = 0$, получим:

$$E = E_1 \left| \frac{\sin \left[\frac{n}{2} (kd \sin \theta) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (kd \sin \theta) \right]} \right| . \quad (6)$$

Напряженность излучаемого антенной поля максимальна в направлении $\theta = 0$ (главный максимум), т.е. экваториальной плоскости антенны. Поля от отдельных излучателей в направлении $\theta = 0$ синфазны и складываются арифметически. Выражение множителя системы в этом случае представляет собой неопределенность вида $\frac{0}{0}$, при раскрытии которой оказывается, что множитель системы максимален и равен n . Таким образом, в этом случае выражение (5) можно записать

$$E_{max} = nE_1.$$

Такой же вид принимает выражение (5) и при $\theta = 180^\circ$.

Направления, в которых отсутствует излучение, определяются из условий равенства нулю числителя множителя системы, т.е. $nkd \sin \theta_{0N} / 2 = \pi N$, откуда:

$$\sin \theta_{0N} = N \cdot \lambda / nd, \quad (7)$$

где $N=1,2,3 \dots n$.

Рассмотрим для примера конкретный случай антенной решетки из 4-х излучателей. Определим положение нулей в ДН:

$$\theta_{04} = \arcsin \frac{N\lambda}{4d},$$

Характеристики АР при $f=4$ ГГц, $\lambda = 7.5$ см, расстояние между излучателями $d=3$ см.

Шаг решетки $d / \lambda = 0.4$. Точка минимума в ДН при $N=1$, $\theta_1 = 38,7^\circ$ для 4 ГГц, для случая $f=5.5$ ГГц; $\lambda = 5.46$ см; $d / \lambda = 0.55$

$$\theta_1 = \arcsin \frac{\lambda}{4d} = 27.3^\circ,$$

$$\theta_2 = \arcsin \frac{2\lambda}{4d} = 65.5^\circ, \text{ т.е. у нас два минимума.}$$

Таким образом, чем больше частота, тем больше лепестков в ДН АР.

Диаграмма направленности АР состоящая из 4-х одинаковых излучателей, определяется соотношением:

$$F(\theta) = F_1(\theta) \frac{1}{4} \left| \frac{\sin[2(kd \sin \theta)]}{\sin\left[\frac{1}{2}(kd \sin \theta)\right]} \right|, \quad (8)$$

где диаграмма направленности одного излучателя (спирали Архимеда), согласно приложению 3, имеет вид

$$F(\theta) = [J_0(\sin \theta) + J_2(\sin \theta)] \sqrt{\frac{1 + \cos^2 \theta}{2}}.$$

Коэффициент направленного действия

Степень концентрации излучаемой мощности в данном направлении оценивается коэффициентом направленного действия (КНД), которая рассчитывается по формуле:

$$D_{max} = \frac{|E_{max}|^2 2\pi R}{WP_{\Sigma}},$$

где $|E_{max}|$ - модуль полного вектора напряженности поля в направлении максимального излучения на расстоянии R ; P_{Σ} - излучаемая мощность; W - волновое сопротивление среды.

Согласно этому определению КНД излучателя показывает, во сколько раз должна быть увеличена излучаемая мощность при замене направленного излучателя на абсолютно не направленную гипотетическую изотропную антенну при условии сохранения постоянной величины модуля вектора Пойтинга в точке приема.

Пользуясь этим определением КНД, и учитывая, что для направления максимального излучения $[F_{max}^2(\theta_0, \varphi_0) = 1]$, получаем:

$$D_{max} = \frac{P_{\Sigma \varrho \varphi \theta \delta}}{D_{\Sigma}} = \frac{4\pi}{\int_{\Omega=4\pi} F^2(\theta, \varphi) d\Omega},$$

где $F(\theta)$ для линейной спиральной решетки определяется по формуле (8).

Приближенные значения КНД линейной равномерной решетки определяется выражением:

$$\hat{A}^{(N)} = \frac{\psi_{max} N}{1 + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \left(1 - \frac{n}{N}\right) \cos kd \frac{\sin nkd}{nkd}}, \quad (9)$$

где ψ_{max} - максимум ДН по мощности

Коэффициентом усиления (КУ) системы (одионого излучателя или решетки) называют произведение:

$$G = D \cdot \eta,$$

где η КПД системы.

Коэффициент усиления показывает, во сколько раз должна быть увеличена входная мощность при замене реальной направленной излучающей системы потерями на абсолютно ненаправленную изотропную антенну без потерь при условии сохранения постоянной величины модуля вектора Пойтинга в токе наблюдения.

Можно оценить коэффициент усиления системы по ширине диаграммы направленности [1]:

$$D = \frac{32000 - 36000}{\Delta\theta^0 \Delta\varphi^0}, \quad (10)$$

$\Delta\varphi = 360^0, \Delta\theta^0$ - ширина ДН по половинному уровню мощности.