

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

Кафедра радиотехнических устройств

Е.Е. Нечаев

АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

Методические указания к лабораторным занятиям

*для студентов III курса дневного и IV курса
заочного обучения по специальности 201300*

Москва - 2004

Рецензент: кандидат технических наук, доцент Д.Н. Яманов

Нечаев Е.Е.

Антенны и устройства СВЧ. Методические указания к лабораторным занятиям. М. МГТУГА, 2004г.

Данные методические указания издаются в соответствии с учебным планом для студентов III курса дневного обучения и IУ курса заочного обучения по специальности 20.13.00.

Рассмотрены и одобрены на заседаниях кафедры и Методического совета факультета.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

В.І. Порядок выполнения лабораторных работ

1. Лабораторная работа №1. Исследование симметричного вибратора
2. Лабораторная работа №2. Исследование директорной антенны
3. Лабораторная работа №3. Исследование рупорных антенн
4. Лабораторная работа №4. Исследование зеркальных антенн
5. Лабораторная работа №5. Исследование синфазной антенной решетки

Введение

Настоящие методические указания содержат необходимые сведения для выполнения лабораторных работ по дисциплине "Антенны и устройства СВЧ".

Выполнение лабораторных работ предусматривает самостоятельную предварительную подготовку студентов, проведение экспериментов в лаборатории, обработку полученных результатов, составление отчета и сдачу зачета.

В.І. *Порядок выполнения лабораторных работ.*

В.І.І. *Подготовка к выполнению лабораторных работ.*

В процессе самостоятельной (домашней) подготовки необходимо изучить описание лабораторной работы, разобраться в схеме установки и методике измерений. Кроме того, необходимо проработать соответствующие теоретические разделы курса (необходимая литература указана в конце описания каждой лабораторной работы), выполнить предусмотренные заданием расчеты и заготовить форму отчета, оставив в ней место для экспериментальных данных и выводов.

В.І.2. *Проведение экспериментальных измерений в лаборатории и обработка полученных результатов.*

Перед выполнением работы каждый студент представляет подготовленные к ее проведению материалы, заготовку отчета с необходимыми схемами, расчетами и графиками.

Подготовка студентов в занятиях проверяется преподавателем методом предварительного опроса по материалам выполняемой работы. Примеры контрольных вопросов имеются в методических указаниях к каждой лабораторной работе. Неподготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

При выполнении экспериментов студенты обязаны соблюдать правила техники безопасности.

При снятии диаграммы направленности (ДН) антенны рекомендуется сначала произвести опыт без записей результатов измерений, оценить ожидаемую форму диаграммы направленности. Наличие большого числа рассеивателей электромагнитного поля в лаборатории может приводить к сильным искажениям диаграмм направленности исследуемых антенн. В этом случае, можно рекомендовать подбор места положения ан-

тены в лаборатории с целью минимизации искажений формы диаграммы направленности. Затем следует снять экспериментальную зависимость, занеся получаемые результаты в заготовленные таблицы. Как правило, по всем табличным данным строятся графики или диаграммы. Расчеты, связанные с обработкой экспериментальных данных, следует выполнять в лаборатории с использованием вычислительных средств. По полученным результатам делаются выводы. При отличии экспериментальных данных от теоретических необходимо дать объяснение этому отличию.

После окончания экспериментальной части работы студенты предъявляют преподавателю экспериментальный материал и при его одобрении выключают приборы и приступают к оформлению отчета по лабораторной работе.

В.1.3. Составление отчета

Отчет по лабораторной работе составляется каждым студентом на стандартных листах писчей бумаги. Графики, при необходимости, вычерчиваются на миллиметровой бумаге, диаграммы направленности строятся либо в полярной, либо в декартовой системе координат.

На графиках должны быть указаны размерности, откладываемых по осям величин, расчетные или экспериментальные точки. На поле графика следует указать также величины, существенные для характеристики условий эксперимента.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- титульный лист;
- структурную или функциональную схему установки;
- экспериментальные данные в виде таблиц, графиков, диаграмм;
- выводы по работе.

В.1.4. Сдача отчета и получение зачета

При хорошей предварительной подготовке работа может быть оформлена и защищена в течение времени, отводимого на ее выполнение. В противном случае работа сдается в начале следующего занятия.

Зачет за семестровый цикл лабораторных работ выставляется при наличии зачетов по всем лабораторным работам.

І. Лабораторная работа № І

Исследование симметричного вибратора

І.І. Основные теоретические положения

Целью работы является исследование влияния относительных размеров симметричного вибратора на его диаграмму направленности (ДН), влияния на ДН симметрирующего устройства, изучение поляризационной характеристики (ПХ) симметричного вибратора.

Схема установки показана на рис. І.І. Она включает в себя поворотное устройство І, на нём закреплен макет исследуемой антенны 2, измерительный

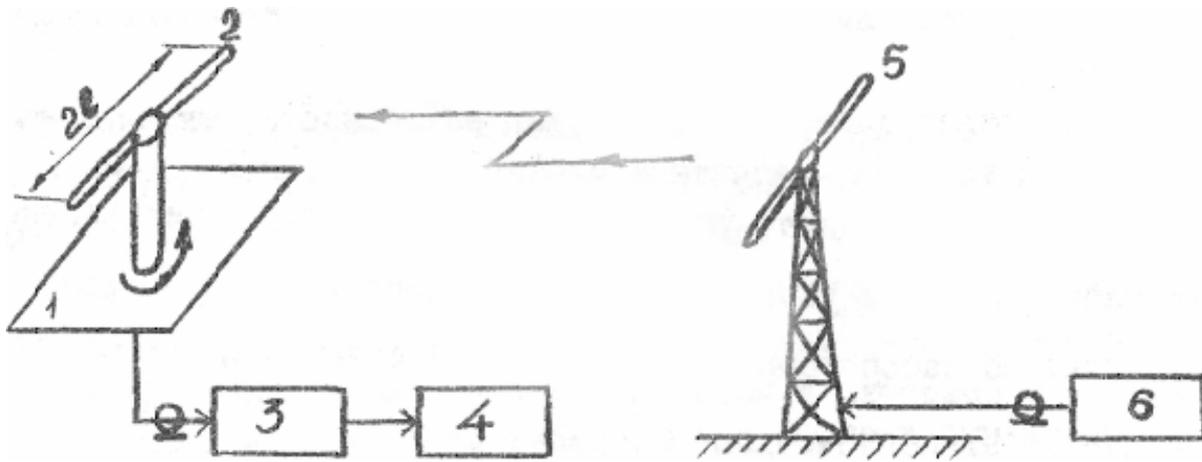


Рис.І.І. Схема лабораторной установки.

приемник 3 с индикаторным устройством 4. Передающая часть установки состоит из передающей антенны 5 и генератора стандартных сигналов 6. В качестве измерительного приемника используется анализатор спектра С4-60 (или С4-27). Индикаторным устройством, в этом случае, является штатный индикатор данного прибора.

Антенна служит не только для излучения (или приема) электромагнитной энергии, но и для распределения ее соответствующим образом в пространстве. Это распределение характеризуется диаграммой направленности антенны по напряженности поля $F = E(\theta, \varphi)$ и по мощности $P = P(\theta, \varphi)$. В общем случае диаграмма направленности является комплексной величиной. Поэтому различают амплитудную диаграмму направленности и фазовую ДН антенны. На практике, в основном, поль-

зуются понятием амплитудной ДН.

Амплитудной ДН антенны по полю называется зависимость напряженности поля создаваемого антенной в точке наблюдения от направления на эту точку при неизменном (фиксированном) расстоянии от антенны. Так как $E/H = 120\pi$ и $P = E^2/120\pi$, то диаграмма направленности антенны по мощности пропорциональна квадрату ДН по напряженности поля.

$$P(\theta, \varphi) = E^2(\theta, \varphi)/120\pi. \quad (1.1)$$

Обычно пользуются понятием нормированной диаграммы направленности антенны, под которой понимают отношение напряженности поля, создаваемого антенной в произвольном направлении, к напряженности поля в направлении максимального излучения

$$F(\theta, \varphi) = E(\theta, \varphi)/E_{\text{МАКС}}(\theta, \varphi) \quad (1.2)$$

На практике ограничиваются диаграммами направленности в двух взаимно перпендикулярных плоскостях: диаграммой направленности в плоскости электрического вектора $F(\theta)$ (в плоскости E) и диаграммой направленности в плоскости магнитного вектора $F(\varphi)$ (в плоскости H).

Нормированная диаграмма направленности симметричного вибратора в плоскости E хорошо аппроксимирует выражение

$$F(\theta) = \left| \frac{\cos(kl \sin \theta) - \cos kl}{(1 - \cos kl) \cos \theta} \right| \quad (1.3)$$

здесь угол θ отсчитывается в плоскости вибратора от нормали к его оси, а $k = 2\pi/\lambda$.

В плоскости H симметричный вибратор не проявляет направленных свойств, т.е. $F(\varphi) = 1$.

Направленные свойства антенны характеризуются также ее коэффициентом направленного действия (КНД), под которым понимается отношение мощностей излучения ненаправленной и направленной антенн, создающих в точке приема (расположенной на одинаковом расстоянии от обеих антенн) одинаковую напряжённость поля.

Поляризация антенны определяется положением в пространстве плоскости поляризации излучаемой волны, проходящей через вектор напряженности электрического

поля (E) и вектор Пойтинга.

Поляризационной характеристикой (ПХ) антенны называется зависимость ЭДС на зажимах приемной антенны $u(\alpha)$ от угла ее поворота в плоскости перпендикулярной направлению приема (см. рис. 1.2).

Диаграмма направленности антенны, закрепленной на металлическом основании, может быть определена методом зеркального изображения. Так, диаграмма направленности симметричного вибратора в плоскости Н рассчитывается по формуле

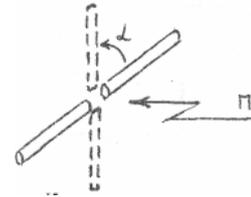


Рис. 1.3.

$$F(\varphi) = \sin(kh \cos \varphi), \quad (1.4)$$

а в плоскости E

$$F(\theta) = \left[\frac{\cos(kl \sin \theta) - \cos(kl)}{(1 - \cos kl) \cos \theta} \right] \sin(kh \cos \theta), \quad (1.5)$$

где первый сомножитель представляет собой диаграмму направленности симметричного вибратора, а второй сомножитель – множитель решётки, состоящей из двух вибраторов: одного реального, а второго фиктивного, зеркального отраженного, имеющего противоположную фазу питающего тока; h – высота вибратора над металлическим основанием.

Антенны в виде симметричного вибратора находят очень широкое применение. В лабораторной работе исследуются свойства антенны радиовысотомера РВ - 2.

1.2. Задание для расчета

1. Рассчитайте ДН симметричного вибратора в плоскости E для трех значений его относительной длины: $2l/\lambda = 0,5; 0,25$ и $1,25$.

2. Рассчитайте ДН симметричного полуволнового вибратора в плоскости E для трех значений его относительной высоты подвеса над металлическим основанием $h/\lambda = 0,25; 0,5$ и $1,0$. Постройте все ДН в полярной системе координат.

1.3. Порядок выполнения работы

1.3.1. Снять ДН симметричного вибратора в плоскости Е для нескольких значений его относительной длины $2l/\lambda$ (по указанию преподавателя, например, для $2l/\lambda = 0,5; 0,25$ и $1,25$).

Для этого измерьте длину плеч вибратора 2 и в соответствии с заданием определите необходимую частоту: $f = C/\lambda$, где $C = 3 \cdot 10^8$, м/с.

Включите генератор и установите требуемую частоту. Закрепите вибратор 5 и исследуемую антенну 2 горизонтально (в Е-плоскости) и с помощью поворотного устройства сориентируйте друг на друга.

Включите анализатор спектра и настройте его преобразователь частоты на частоту генератора, при этом на индикаторе появится сигнал.

Поворачивая с помощью поворотного устройства стенда исследуемую антенну в пределах ± 90 , оцениваем ДН в единицах шкалы индикаторного устройства.

Данные измерения повторяются на остальных частотах. Результаты измерений сведите в таблицу, нормируйте данные и постройте ДН в полярной системе координат. Сравните экспериментальные диаграммы направленности с расчетными.

1.3.2. Оценить влияние симметрирующего устройства на диаграмму направленности симметричного вибратора.

Для этого установите частоту генератора равной $f_0 = 0,25C/l$. Закрепите на поворотном устройстве антенну без симметрирующего устройства.

Следуя методике, изложенной в п.1.3.1, снимите ДН антенны. Результаты сведите в таблицу и постройте ДН.

Сравните её с ДН антенны с симметрирующим устройством, снятой в п.1.3.1.

1.3.3. Снять поляризационную характеристику антенн с симметрирующим и без симметрирующего устройства

Для этого настройте генератор на частоту $f_0 = 0,25C/l$. Сориентируйте антенны 2 и 5 (рис. 1.1) друг на друга и зафиксируйте поворотное устройство. Поляризационная характеристика снимается поворотом одной из антенн в плоскости, перпендикулярной направлению максимума приема (см. рис. 1.2).

Литература

1. Нечаев Е.Е. Слабонаправленные антенны и линейные антенны бегущей волны. Часть 1, Учебное пособие, М., МГТУГА, 1997, 120с.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение ДН антенны ([1], стр. 7-8).
2. Дайте определение КНД антенны. Расскажите о зависимости КНД симметричного вибратора от его длины ([1], стр. 12-13; 47).
3. Каков характер распределения тока и заряда по симметричному вибратору ([1], стр. 43-44)?
4. Поясните принцип действия симметрирующего устройства в виде U-колена и симметрирующей приставки ([1], стр. 57-60).
5. Объясните характер зависимости входного сопротивления симметричного вибратора от его длины ([1], стр. 47-49).
6. Какова зависимость сопротивления излучения симметричного вибратора от его длины ([1], 46-47)?
7. Объясните влияние металлического экрана на ДН вибратора ([1], стр. 80-84).
8. Расскажите о методике измерения ПХ антенн ([1], стр. 10-12).

2. Лабораторная работа № 2

Исследование директорной антенны

2.1. Основные теоретические положения

Целью работы является исследование влияния рефлектора и директоров на диаграмму направленности директорной антенны и приобретение навыков ее настройки.

Схема лабораторной установки показана на рис.2.1.

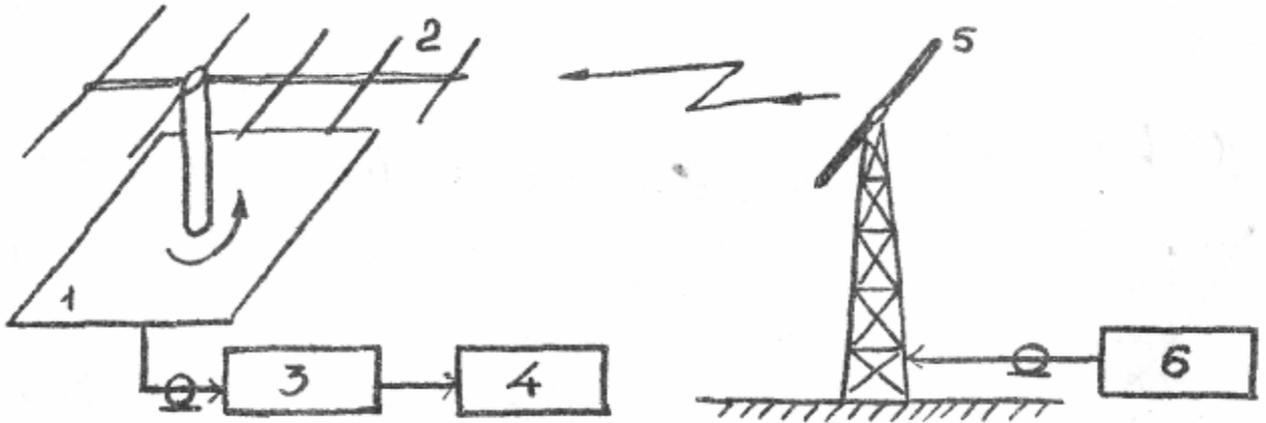


Рис. 2.1. Схема лабораторной установки

Она включает в себя поворотное устройство I, на котором закреплен макет директорией антенны, измерительный приемник 3 с индикаторным устройством 4. Передающая часть установки состоит из передающей (логопериодической) антенны 5 и генератора стандартных сигналов 6.

Система "активный вибратор - пассивный рефлектор" обладает односторонней направленностью. Более узкую ДН имеет директорная антенна (антенна типа "волновой канал"), состоящая из одного активного вибратора, пассивного рефлектора и нескольких пассивных директоров. Конструкция антенны была получена экспериментально. Директорная антенна образуется из ряда вибраторов, располагаемых параллельно в общей плоскости и образующих "волновой канал" (рис.2.2). Один из вибраторов является активным I, остальные - пассивными 2,3.

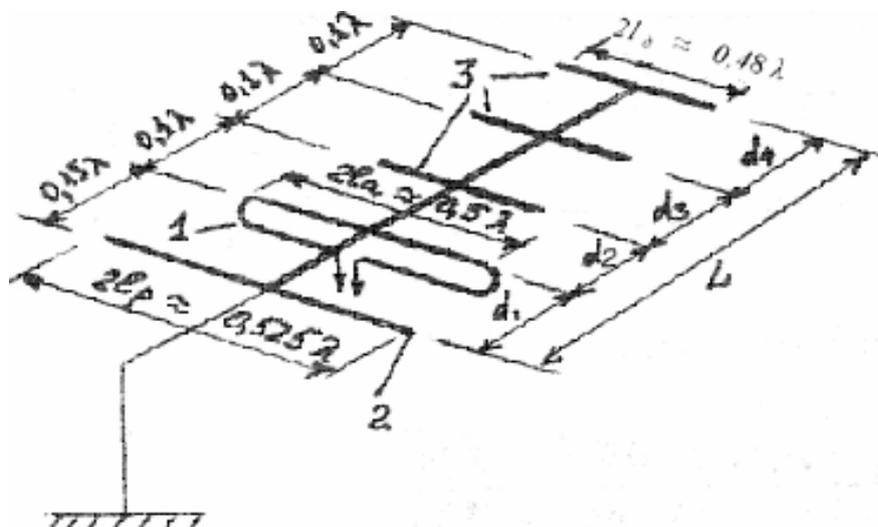


Рис. 2.2. Конструкция директорной антенны

В качестве активного вибратора чаще всего используется шлейф-вибратор, обладающий большим входным сопротивлением (~300 Ом), что с учетом вносимых пассивными вибраторами сопротивлений обеспечивает согласование антенны с Фидером, волновое сопротивление которого 75 Ом. Один из пассивных вибраторов, расположенный сзади активного, играет роль рефлектора 2, а другие, располагаемые впереди активного вибратора, играют роль директоров 3.

Рефлектор компенсирует излучение активного вибратора в обратном направлении. Для этого необходимо, чтобы наведенный ток в рефлекторе опережал по фазе ток в активном вибраторе, что достигается индуктивной настройкой рефлектора путем увеличения его длины по сравнению с длиной активного вибратора.

Для синфазного сложения полей активного вибратора и директора ток директора должен отставать по фазе от тока активного вибратора, что достигается емкостной настройкой директора путем уменьшения его длины по сравнению с длиной активного вибратора.

Вибраторы директорной антенны можно крепить средними точками к продольному металлическому стержню (рис.2.2). Этот стержень не возбуждается, поскольку силовые линии вектора E пересекают его под прямым углом, что позволяет монтировать антенну без изоляторов.

Для оценки ДН ее можно рассчитать по приближенной формуле для антенной решетки с осевым излучением.

В плоскости E ДН будет описываться формулой

$$F(\theta) = F_1(\theta) * F_n(\theta) \quad (2.1)$$

где $F_1(\theta)$ - нормированная ДН активного вибратора (см. формулу (1.3)); $F_n(\theta)$ - множитель решетки, равный

$$F_n(\theta) = \frac{\sin[0,5nkd(\cos\theta - \xi)]}{\sin[0,5kd(\cos\theta - \xi)]} / n, \quad (2.2)$$

где n - число излучателей решетки, d - шаг решетки, $k = 2\pi/\lambda$, $\xi = C/V_\phi = 1$ - коэффициент замедления.

В плоскости Н ДН директорной антенны определяется множителем решетки $F(\varphi) = F_n(\varphi)$, вследствие того, что $F_1(\varphi) = 1$.

Так как активный вибратор является слабонаправленной антенной, то понятно, почему диаграммы направленности антенны типа «волновой канал» в обеих плоскостях примерно одинаковы.

Ширина диаграммы направленности антенны типа "волновой канал" и КНД могут быть оценены выражениями

$$2\theta_{0,5}^\circ \approx 108\sqrt{\lambda/L}, \quad D \approx 7 * L/\lambda, \quad (2.3)$$

Здесь L - длина антенны (длина решетки).

Директорные антенны находят достаточно широкое применение, например, в качестве приемных телевизионных антенн в метровом и дециметровом диапазонах длин волн, в качестве излучателей в антенных решетках и т.п.

2.2. Задание для расчета

Рассчитайте диаграмму направленности пятиэлементной директорной антенны (рис.2.2) в плоскостях Е и Н, считая, что $\xi = C/V_\phi = 1$.

Постройте эти диаграммы направленности в полярной системе координат.

2.3. Порядок выполнения работы

2.3.1. Снять ДН системы "активный вибратор - пассивный рефлектор" в плоскости Е.

Для этого установите на стенде I (см. рис. 2.1.) в качестве активного вибратора шлейф - вибратор с траверсой для крепления пассивных вибраторов. Измерьте длину $2l_a$.

Включите генератор и установите его частоту $f \approx 0,24C/l_a$, где $C = 3 * 10^8$ скорость света в свободном пространстве.

Установите шлейф - вибратор и передающую антенну 5 горизонтально. Сориентируйте их друг на друга. Настройте анализатор спектра на частоту принимаемого сигнала. Зафиксируйте стопором угловое положение поворотного устройства. Уста-

новите на траверсе рефлектор. Передвигая рефлектор вдоль траверсы и, изменяя длину его плеч, добейтесь минимального сигнала на индикаторном устройстве 4 в направлении рефлектора.

Снимите диаграмму направленности системы "активный вибратор - пассивный рефлектор" в плоскости Е по методике, описанной в лабораторной работе I (см. п. I.3.I).

Постройте диаграмму направленности системы в полярной системе координат.

2.3.2. Оценить влияние числа директоров на диаграмму направленности антенны типа "волновой канал".

Для этого сориентируйте приемную антенну в направлении максимума принимаемого сигнала. Установите на траверсу первый директор. Передвигая директор вдоль траверсы и изменяя его длину, добейтесь максимальных показаний на индикаторе спектроанализатора.

Снимите ДН антенны по методике, изложенной в п. I.3.I.

Установите на траверсе второй директор, настройте его по методике, изложенной выше, для случая одного директора. Снимите диаграмму направленности антенны.

Повторите те же операции при трех директорах. При установке последующих директоров может потребоваться незначительная подстройка предыдущих директоров.

Результаты измерений сведите в таблицу, пронумеруйте и постройте диаграммы направленности антенн в полярной системе координат. На отдельном графике постройте рассчитанную и экспериментальную нормированные ДН пятиэлементной антенны.

Измерьте длину пассивных вибраторов $2L_p, 2L_o$ расстояния между ними d и сравните их с рекомендуемыми размерами антенны.

2.3.3. Снять ДН директорной антенны в плоскости Н.

Для этого директорную (с тремя директорами) и передающую логопериодическую антенны поверните в плоскость Н.

Снимите ДН антенны по методике, изложенной в п.1.3.1.

Результаты измерений сведите в таблицу, пронумеруйте и постройте диаграмму направленности антенны в полярной системе координат. На этом же графике постройте рассчитанную в п.2.2 ДН антенны в плоскости Н.

2.3.4. Определить ширину ДН и КНД настроенной директорной антенны.

Для этого по графику ДН настроенной директорной антенны с тремя директорами определите ее ширину. Измерьте общую длину L антенны (рис.2.2) и по формулам (2.3) определите расчетные значения $2\theta_{0,5}^{\circ}$ и D .

Сравните экспериментальное значение $2\theta_{0,5}^{\circ}$ с расчетным.

Литература

1. Нечаев Е.Е. Слабонаправленные антенны и линейные антенны бегущей волны. Часть 1, Учебное пособие, М., МГТУГА, 1997, 120с.

Контрольные вопросы

1. Расскажите об особенностях построения антенны типа "волновой канал" ([1], стр.98-100).

2. Почему в качестве активного вибратора в директорной антенне используется шлейф-вибратор ([1], стр.99)?

3. Какова ДН шлейф-вибратора в Е и Н плоскостях ([1], стр.53)?

4. Какова ДН системы "активный вибратор - пассивный рефлектор" в плоскостях Е и Н ([1], стр.78-80)?

5. Почему вибраторы можно крепить на траверсе без изоляторов ([1], стр.99)?

6. Зачем необходима индуктивная расстройка рефлектора и емкостная расстройка директора ([1], стр. 79)?

7. Какова зависимость КНД директорной антенны от числа директоров, почему их число ограничено ([1], стр.100)?

8. Почему ДН директорной антенны в плоскостях Е и Н примерно одинаковые ([1], стр.99)?

3. Лабораторная работа № 3

Исследование рупорных антенн

3.1. Основные теоретические положения

Целью работы является исследование диаграмм направленности (ДН) и поляризационной характеристики (ПХ) рупорной антенны с линейной поляризацией и исследование корректирующего действия металлопластинчатой линзы.

Схема установки показана на рис.3.1. Она включает в себя рупорную антенну 1 с линейной поляризацией, антенну 2, стенд 3 с поворотным устройством, спектроанализатор 4 и генератор 5.

В работе исследуется пирамидальная рупорная антенна, образованная расширением поперечного сечения прямоугольного волновода, рассчитанного на распространение волн H_{10} . При этом излучаемое поле имеет линейную поляризацию.

Без учета фазовых ошибок в раскрыве рупора, обусловленных отличием фронта волны от плоского, ДН антенны в Е и Н плоскостях определяются выражениями:

$$F(\theta) = \left| \frac{(1 + \cos \theta)}{2} \sin\left(\frac{\pi L_E}{\lambda} \sin \theta\right) / \left(\frac{\pi L_E}{\lambda} \sin \theta\right) \right|, \quad (3.1)$$

$$F(\theta) = \left| \frac{(1 + \cos \varphi)}{2} \cos\left(\frac{\pi L_H}{\lambda} \sin \varphi\right) / \left(1 - \left(\frac{2L_H}{\lambda} \sin \varphi\right)^2\right) \right|, \quad (3.2)$$

где L_E и L_H - размеры раскрыва рупора в Е и Н плоскостях. Ширина ДН по уровню половинной мощности при этом равна:

$$2\theta_{0,5}^o \approx 51\lambda / L_E, \quad 2\varphi_{0,5}^o \approx 68\lambda / L_H \quad (3.3)$$

КНД антенны при плоском и неплоском (близком к сферическому) фронтах волны, соответственно, определяют по следующим формулам:

$$D \approx 0,81 * 4\pi L_E L_H / \lambda^2 , \quad (3.4)$$

$$D \approx 0,64 * 4\pi L_E L_H / \lambda^2 . \quad (3.5)$$

Коррекция фазовых ошибок в раскрыве рупора осуществляется с помощью металлопластинчатой линзы. Она профилирована так, что близкий к сферическому фронт волны, проходя с повышенной фазовой скоростью участки пути вблизи краев линзы, превращается в плоский.

Помимо коррекции фазы колебаний металлопластинчатая линза выравнивает амплитудное распределение в плоскости Н рупора.

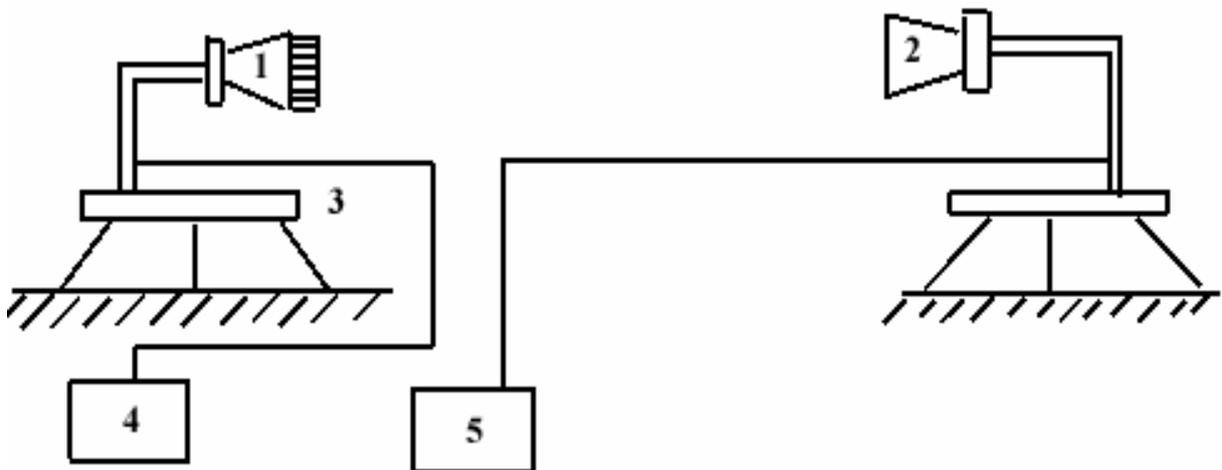


Рис.3.1. Схема установки

Рупорные антенны используются в радиорелейных линиях, в радиоизмерительной аппаратуре и как облучатели зеркальных антенн. Рупорные антенны применяются в самолетном радиовысотомере.

3.2. Задание для расчета

3.2.1. Рассчитать по формулам (4.1) и (4.2) ДН рупорной антенны в Е и Н плоскостях при плоском фронте волны. Результаты свести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

$\theta(\text{град})$										
$F(\theta)$										
$\varphi(\text{град})$										
$F(\varphi)$										

Построить ДН в декартовой системе координат.

3.2.2. Рассчитать по формулам (3.3)...(3.5) ширину ДН в Е и Н плоскостях и КНД рупорной антенны. Результаты свести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

$2\theta_{0,5}^{\circ}$	$2\varphi_{0,5}^{\circ}$	D	
		фронт плоский	фронт не-плоский

Исходные данные для расчета: $f = 8980$ МГц ($\lambda \approx 3,34$ см); $L_E = 9$ см; $L_H = 13,5$ см

3.3. Порядок выполнения работы

3.3.1. Снять ДН в Е и Н плоскостях рупорной антенны с линейной поляризацией поля без корректирующей линзы и с линзой.

Для этого включить генератор 5 (см. рис.3.1) и установить его частоту f согласно расчетным данным.

Настроить прибор 4 на прием сигнала от генератора 5, предварительно сориентировав антенны 1 и 2 одну напротив другой и развернув их так, чтобы плоскость поляризации была ориентирована горизонтально.

По индикатору настройки прибора 4 определить частоту f принятого сигнала и сравнить ее с заданной. При необходимости подстроить генератор.

С помощью поворотного устройства стенда 3 установить антенну 1 в направлении максимума приема.

На экране прибора 4 выставить удобный для наблюдения уровень сигнала и,

поворачивая с помощью поворотного устройства стенда 3 антенну I в горизонтальной плоскости (плоскость E) в пределах $\pm 30^\circ$, снять ДН $F(\theta)$.

Повторить измерения и снять ДН $F(\varphi)$ в плоскости H, для чего антенны I и 2 развернуть так, чтобы плоскость поляризации (плоскость E) была ориентирована вертикально.

Повторить измерения и снять ДН $F(\theta)$ и $F(\varphi)$, установив на антенне корректирующую (профилированную в двух плоскостях) металлопластинчатую линзу (профилированной стороной внутрь рупора).

Результаты свести в таблицу 3.3.

Таблица 3.3.

1. Без линзы	$\theta(\text{град})$								
	$F(\theta)$	1							
2. С линзой		2							
	$\varphi(\text{град})$								
	$F(\varphi)$	1							
		2							

Построить ДН в декартовой системе координат. Сравнить экспериментальные и расчетные ДН.

3.3.2. Определить ширину ДН в E и H плоскостях рупорной антенны без линзы и с линзой.

Для этого определить по экспериментальным кривым $F(\theta)$ и $F(\varphi)$ их ширину $2\theta_{0,5}^\circ$ и $2\varphi_{0,5}^\circ$. Результаты свести в таблицу 3.4.

Таблица 3.4.

Без линзы		С линзой	
$2\theta_{0,5}^\circ$	$2\varphi_{0,5}^\circ$	$2\theta_{0,5}^\circ$	$2\varphi_{0,5}^\circ$

Сравнить результаты с расчетными данными, полученными в п.3.2.2.

3.3.3. Снять ПХ рупорной антенны с линейной поляризацией поля без линзы.

Для этого антенны I и 2 развернуть так, чтобы их плоскость поляризации была направлена горизонтально.

Установить антенну I с помощью поворотного устройства стенда 3 в положение максимума приема, поворачивая антенну I в плоскости, перпендикулярной к направлению максимума приема снять $u(\alpha)$. Результаты свести в таблицу 3.5.

Таблица 3.5

$\alpha(\text{град})$							
$u(\alpha)$							

Построить ПХ в декартовой системе координат.

Литература

1. Нечаев Е.Е. Излучающие раскрыты и решётки. Часть 2, Учебное пособие, М., МГТУГА, 1998, 80с.

Контрольные вопросы

1. Как возникает фазовая ошибка в рупорной антенне и как она влияет на её ДН ([1], стр.32-33)?

2. Из каких соображений выбирается длина рупора ([1], стр.33-34)?

3. Каково амплитудное распределение поля в раскрыве рупорной антенны, возбуждаемой волной H_{10} ([1], стр.24)?

4. Как влияет амплитудное распределение поля в раскрыве рупорной антенны на её ДН ([1], стр.7-10)?

5. Каков принцип действия металлопластинчатой линзы? Какие линзы Вы знаете еще? Каковы их достоинства и недостатки ([1], стр.39-42)?

6. Каким образом выбирают профили металлопластинчатой линзы и расстояние между пластинами ([1], стр.41)?

7. Как металлопластинчатая линза влияет на амплитудное распределение поля в раскрыве рупорной антенны ([1], стр.44-45)?

8. Как обеспечивается эллиптическая поляризация поля в рупорных антеннах? Каково отличие ПХ антенны с эллиптической поляризацией от ПХ антенны с линейной поляризацией ([1], стр.35-37)?

4. Лабораторная работа № 4

Исследование зеркальных антенн

4.1. Основные теоретические положения

Целью работы является исследование диаграмм направленности (ДН) и поляризационных характеристик (ПХ) зеркальных антенн с различной формой зеркала; исследование влияния на ДН и ПХ антенны смещения облучателя из фокуса антенны.

Схема установки приведена на рис. 5.1, где изображено:

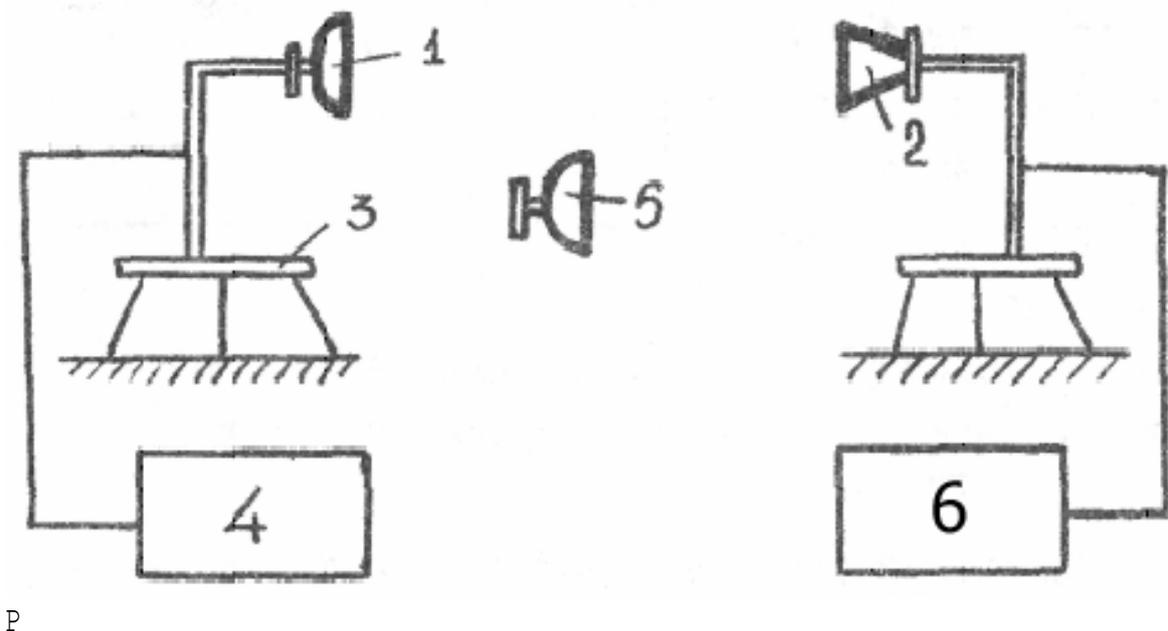


Рис. 4.1. Схема лабораторной установки

Антенна 1 с зеркалом в виде части параболоида вращения с эллипсоидальным раскрывом, антенна 2, стенд 3 с поворотным устройством, спектроанализатор 4, антенна 5 с зеркалом в виде параболоида вращения с «козырьком», генератор 6.

Наиболее узкую осесимметричную ДН обеспечивает зеркало в виде параболоида вращения. При этом ДН антенны определяется выражением

$$F(\theta) = \Lambda_{n+1}\left(\frac{2\pi}{\lambda} R \sin \theta\right), \quad (4.1)$$

где $\Lambda_{n+1}(x)$ - лямбда-функция $(n+1)$ -го порядка; $n = 0, 1, 2, \dots$ - показатель степени полинома

$$\frac{E_s}{E_0} = \left(1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2\right)^n, \quad (4.2)$$

аппроксимирующего амплитудное распределение поля в раскрыве антенны; R радиус раскрыва антенны; λ - рабочая длина волны; x - текущее расстояние от центра раскрыва.

Ширина ДН, КНД и КУ определяются из выражений

$$2\theta_{0,5}^{\circ} = A\lambda/2R, \quad D = 4\pi SB/\lambda^2, \quad G = \eta D, \quad (4.3)$$

где $S = \pi R^2$ - площадь раскрыва зеркала; λ - рабочая длина волны; $\eta \approx 0,95$ - КПД антенны; A и B - коэффициенты, зависящие от n (приведены в таблице 4.1).

Таблица 4.1.

n	A	B
0	59	1
1	73	0,75
2	84	0,55

Смещение облучателя из фокуса приводит к расширению ДН и повышению уровня боковых лепестков из-за нарушения синфазности поля в раскрыве антенны, смещение облучателя приводит также к отклонению максимума ДН и появлению паразитной поляризации поля вследствие асимметрии распределения токов на поверхности зеркала.

Получение ДН специальной формы в одной плоскости, в частности, косекансной

$$F(\theta) = 1/\sin \theta = \operatorname{cosec} \theta, \quad (4.4)$$

обеспечивающей в вертикальной плоскости постоянство уровня сигнала от ближних и дальних целей, достигается приданием зеркалу формы, отличной от параболоида вследствие применения "козырька".

Для создания осесимметричной ДН при одном виде поляризации поля и близкой к косекансной ДН для другого вида поляризации используется зеркало в виде параболоида вращения, часть которого снабжена "козырьком", представляющим собой систему проводников, вплетенных в радиопрозрачный материал и ориентированных параллельно вектору E в случае, когда ДН должна иметь форму близкую к косекансной.

Изменение поляризации поля излучения осуществляется путем изменения поляризации поля облучателя с помощью ферритового поляризатора, работающего на основе использования эффекта Фарадея.

Для исключения методической погрешности при снятии ДН, связанной с фазовыми ошибками, необходимо, чтобы расстояние между передающей и приемной антеннами удовлетворяло условию

$$r \geq (l_{\text{МАКС}} + L_{\text{МАКС}})^2 / \lambda, \quad (4.5)$$

где $l_{\text{МАКС}}$ и $L_{\text{МАКС}}$ наибольшие размеры раскрыва передающей и приемной антенн.

КНД антенны может быть определен графически по ее ДН. Известна связь КНД с ДН, которая имеет вид

$$D = 4\pi \int_0^\pi \int_0^{2\pi} F^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (4.6)$$

Для осесимметричных ДН формула (4.6) преобразуется к следующему виду

$$D = 2\pi \int_0^\pi F^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta, \quad (4.7)$$

где $F(\theta)$ - нормированная ДН.

Таким образом, при графическом определении КНД необходимо построить график функции $\nu(\theta) = F^2(\theta, \varphi) \sin \theta$ в декартовой системе координат и определить площадь S , ограниченную графиком этой функции и осью абсцисс в области $0 \leq \theta \leq \pi$. Кроме этого необходимо построить в этой же системе координат прямоугольник, площадь которого S_1 принимается за единичную. При этом угол θ отсчитывается от оси симметрии ДН и измеряется в радианах, а КНД вычисляется по формуле

$$D = 2S_1 / S \quad (4.8)$$

Зеркальные антенны используются в качестве радиолокационных, например, в самолетных метеонавигационных РЛС "Гроза", радиотелеметрических антенн, антенн радиорелейных линий связи, а также в качестве радиотелескопов и антенн космической радиосвязи.

4.2. Задание для расчета

4.2.1. По формулам (4.3) с учетом табл.4.1 рассчитать ширину ДН, КНД и КУ параболической антенны с козырьком в режиме осесимметричной ДН для различных значений параметра n . Результаты расчета свести в табл.4.2.

Таблица 4.2.

n	$2\theta_{0,5}^{\circ}$	D	F
0			
1			
2			

4.2.2. По формуле (4.4) рассчитать косекансную ДН антенны. Результаты свести в табл. 4.3, построить ДН в декартовой системе координат.

Таблица 4.3

$\theta(\text{град})$										
$F(\theta)$										

Исходные данные для расчета: $f = 9370$ МГц ($\lambda \approx 3,2$ см); $R = 38$ см; $\eta = 0,95$.

4.3. Порядок выполнения работы

4.3.1. Снять ДН в горизонтальной плоскости антенны с зеркалом в виде части параболоида вращения с эллипсоидальным раскрывом при различных положениях облучателя.

Для этого включить генератор 6 (см. рис.4.1) и установить его частоту f в соответствии с расчетными данными.

Настроить прибор 4 на прием сигнала генератора 6, предварительно сориенти-

ровав антенны 1 и 2 одну напротив другой.

По индикатору настройки прибора 4 определить частоту f принятого сигнала, сравнить ее с расчетной и при необходимости подстроить генератор 6. Проверить выполнение условия (4.5).

Установить облучатель антенны 1 в фокусе антенны и на экране прибора 4 ручками регулирования и установки мощности выставить удобный для отсчета уровень сигнала.

Поворачивая антенну 1 с помощью поворотного устройства стенда 3 в горизонтальной плоскости в пределах $\pm 30^\circ$ снять ДН $F(\theta)$.

Повторить измерения, сместив облучатель из фокуса в сторону на 30° . Результаты свести в таблицу 4.4.

Таблица 4.4

	$\theta(\text{град})$						
1. Облучатель в фокусе	$F(\theta)_1$						
2. Облучатель не в фокусе	$F(\theta)_2$						

Построить ДН в декартовой системе координат. Оценить влияние смещения облучателя из фокуса на ДН.

4.3.2. Снять ПХ антенн с зеркалом в виде части параболоида вращения с эллипсоидальным раскрывом при различных положениях облучателя.

Для этого сориентировать антенны 1 и 2 одну напротив другой и добиться уровня сигнала удобного для наблюдения на индикаторе прибора 4.

Поворачивая антенну 2 в пределах $\pm 90^\circ$ в плоскости, перпендикулярной к направлению максимума излучения, снять зависимость $u(\alpha)$. Повторить измерения, сместив облучатель из фокуса на 30° в сторону. Результаты свести в табл. 4.5.

Таблица 4.5

	$\alpha(\text{град})$						
1. Облучатель в фокусе	$u(\alpha)_1$						
2. Облучатель не в фокусе	$u(\alpha)_2$						

Построить ПХ в декартовой системе координат. Оценить влияние на ПХ смещения облучателя из фокуса.

4.3.3. Снять ДН параболической антенны с "козырьком" при различных поляризациях поля

Для этого установить антенну с "козырьком" 5 (см. рис.4.1) на стенде 3 так, чтобы "козырек" находился в боковой части зеркала, т.е. развернуть антенну на $\pm 90^\circ$ по сравнению с положением, имеющим место в реальных условиях эксплуатации. Следуя методике, изложенной в п. 4.3.1 и поворачивая антенну 5 в горизонтальной плоскости в пределах $\pm 30^\circ$, снять ДН $F(\theta)$ сначала при ориентации антенны 2, обеспечивающей горизонтальную поляризацию поля излучения, для которой "козырек" антенны 5 радиопрозрачен (осесимметричная ДН), а затем при ориентации антенны 2, обеспечивающей вертикальную поляризацию поля, для которой "козырек" нерадиопрозрачен (косекансная ДН). При этом антенна 2 должна быть расположена так, чтобы в первом случае узкая сторона раскрыва рупора была ориентирована горизонтально, а во втором случае - вертикально. Результаты свести в табл. 4.6.

Таблица 4.6

	$\theta(\text{град})$						
1. Осесимметричная ДН	$F(\theta)_1$						
2. Косекансная ДН	$F(\theta)_2$						

Построить ДН в декартовой системе координат и сравнить их. Сравнить ДН, снятую при нерадиопрозрачном "козырьке" с расчетной косекансной ДН, полученной в п. 4.2.2.

4.3.4. Определить ширину ДН и амплитудное распределение параболической антенны с "козырьком" в режиме осесимметричной ДН.

Для этого по осесимметричной экспериментальной ДН, полученной в п.4.3.3, определить её ширину $2\theta_{0,5}^\circ$.

Сравнить полученный результат с данными табл.4.2.

По табл. 4.2 определить параметр n , соответствующий наибольшей близости расчетного и экспериментального значения $2\theta_{0,5}^\circ$.

По формуле (4.2) для $R = 38\text{см}$ рассчитать амплитудное распределение поля в раскрыве антенны. Результаты свести в табл. 4.7.

Таблица 4.7

x/R							
E_s/E_0							

Построить амплитудное распределение в декартовой системе координат.

4.3.5. Определить КНД параболической антенны с "козырьком" в режиме осесимметричной ДН.

Для этого с использованием экспериментальной ДН, полученной в п.4.3.3, вычислить функцию $\nu(\theta) = F^2(\theta, \varphi) \sin \theta$. Результаты свести в табл.4.8.

Таблица 4.8

$\theta(\text{град})$							
$F(\theta)$							
$F^2(\theta)$							
$\sin \theta$							
$\nu(\theta)$							

Построить функцию $\nu(\theta)$ в декартовой системе координат.

Определить площадь S под кривой и единичную площадь S_1 (в см^2 или количестве клеток)

По формуле (4.10) определить D .

Сравнить полученное значение D с данными табл. 4.2 для выбранного зна-

чения параметра n .

Литература

1. Нечаев Е.Е. Излучающие раскрывы и решётки. Часть 2, Учебное пособие, М., МГТУГА, 1998, 80с.

Контрольные вопросы

1. Как амплитудное распределение поля в раскрыве зеркальной антенны влияет на ее ДН ([1], стр.10-13)?

2. Зачем в короткофокусной зеркальной антенне "вырезают" зоны на зеркале вблизи полюсов тока ([1], стр.52)?

3. Как влияет смещение облучателя в зеркальной антенне на ее ДН и ПХ ([1], стр.54)?

4. Каково назначение зеркальной антенны с косекансной формой ДН и как реализуется такая ДН ([1], стр.66-67)?

5. Каким образом в зеркальных антеннах осуществляется электрическая коммутация ДН (осесимметричная - косекансная) ([1], стр. 67)?

6. Как влияет угол раскрыва зеркальной антенны на коэффициент использования площади раскрыва ([1], стр.53)?

7. Объяснить методику экспериментального определения КНД зеркальной антенны с осесимметричной ДН.

8. Чем обусловлена необходимость наложения ограничения на расстояние между передающей и приемной антеннами при снятии ДН?

5. Лабораторная работа № 5

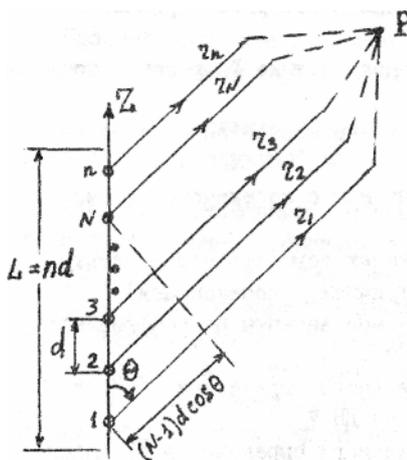
Исследование синфазной антенной решетки

5.1. Основные теоретические положения

Целью работы является изучение принципа действия и исследование направленных свойств синфазной фазированной антенной решетки (ФАР).

Антенной решеткой называется антенная система, состоящая из более чем одного антенного элемента с когерентным излучением. Излучающими элементами могут быть вибраторы, щелевые излучатели, рупоры, спиральные, диэлектрические антенны и т.д.

Антенная система, в которой излучатели расположены вдоль прямой на одинаковом расстоянии друг от друга, получила название линейной решетки (рис.5.1). Здесь d - это расстояние между излучателями (шаг решетки); $L = nd$ - длина



решетки, где n - число ненаправленных излучателей.

Из рис.5.1 видно, что

$$r_2 = r_1 - d \cos \theta ; r_N = r_1 - (N - 1)d \cos \theta ; r_n = r_1 - (n - 1)d \cos \theta .$$

Комплексная амплитуда возбуждения N -го излучателя решетки определяется так

$$\dot{I}_N = I_0 \exp(-j(N - 1)\psi) , \quad (5.1)$$

где $I_0 = 1$ для ненаправленных излучателей, ψ - угол

Рис. 5.1. Линейная решётка

сдвига фаз между токами соседних излучателей. Из (5.1) следует, что изменение фазы вдоль излучателей происходит по линейному закону.

В общем виде амплитудная ДН для решетки из ненаправленных излучателей имеет вид

$$f_n(\theta) = \frac{\sin(0,5n(kd \cos \theta - \psi))}{\sin(0,5(kd \cos \theta - \psi))} . \quad (5.2)$$

Угловое положение главного максимума ДН определяется из соотношения

$$\cos \theta_{ГЛ} = \psi / kd , \quad (5.3)$$

где $k = 2\pi / \lambda$.

Нормированное значение ДН (5.2) можно записать в виде

$$F_n(\theta) = \frac{\sin(\Phi)}{n * \sin(\Phi/n)}, \quad (5.4)$$

где $\Phi = 0,5nkd(\cos\theta - \xi)$ - обобщенная угловая координата, а $\xi = \psi/kd$.

Анализ выражения (5.4) показывает, что помимо основного главного максимума ДН имеет еще побочные главные максимумы в угловых направлениях $\Phi = mn\pi$, где $m = \pm 1, \pm 2$ и т.д.

На рис. 5.2 проиллюстрирован процесс формирования этих максимумов при $m = \pm 1$ и главного лепестка ДН при $m = 0$.

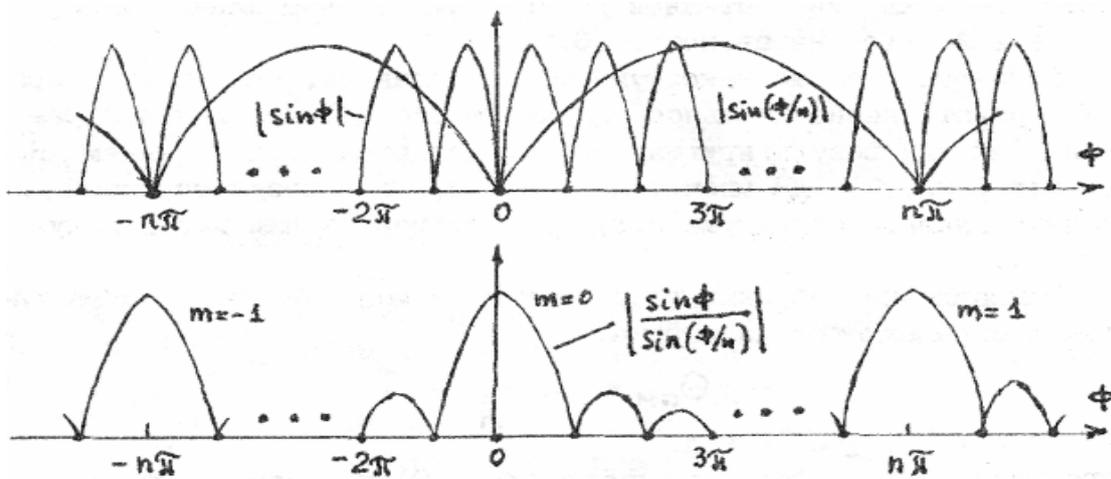


Рис.5.2. К анализу множителя решетки

В инженерной практике нежелательно, чтобы в области видимости помимо главного лепестка ДН были еще и побочные главные максимумы, поскольку это может привести к неопределенности в определении, например, угловых координат цели. Кроме того, вследствие распределения излучаемой мощности по нескольким главным лепесткам ухудшается КНД антенны. На практике стремятся при проектировании антенной решетки избежать появления побочных главных максимумов.

Основные способы подавления побочных главных максимумов следующие:

- а) ограничение шага решетки;
- б) применение направленных излучателей;
- в) неэквидистантное расположение излучателей.

Если шаг решетки ограничить так

$$d \leq \frac{\lambda}{1 + |\cos \theta_{гл}|}, \quad (5.5)$$

то можно избежать появления побочных главных максимумов в области видимости. Как видно из выражения (5.5), при сканировании в секторе углов $\pm 90^\circ$ шаг решетки должен быть меньше $\lambda/2$. Для синфазно возбужденной антенной решетки ($\cos \theta_{гл} = 0$) допустимое расстояние между излучателями должно быть меньше длины волны, т.е. $d \leq \lambda$ (см. неравенство (5.5)).

Побочные главные максимумы можно подавить, если в их направлении создать незначительное излучение собственно элемента решетки. Так как результирующая ДН определяется произведением ДН элемента решетки и множителя решетки, то в результирующей ДН побочные главные максимумы будут отсутствовать или иметь малую величину.

Направления побочных главных максимумов зависят от шага решетки и определяются из выражения

$$\cos \theta_{пм} = m\lambda/d + \xi, \quad (5.6)$$

где $m = \pm 1, \pm 2$ и т.д.

Направление же главного максимума ($m = 0$) не зависит от шага решетки. Если нарушить постоянство шага решетки, но сохранить значение фазовой скорости возбуждения элементов решетки, т.е. $\xi = const$, то направление главного максимума сохранится неизменным, а побочные главные максимумы "размажутся" по широкой зоне углов.

Целью лабораторной работы является исследование линейной синфазной антенной решетки с полуволновыми вибраторными излучателями, установленными на металлическом экране.

ДН такой антенны в плоскости Е определяется следующим выражением:

$$F_n(\theta) = \frac{\cos(\pi/2 * \sin \theta)}{n * \cos \theta} * \frac{\sin(0,5nkd \sin \theta)}{\sin(0,5kd \sin \theta)} * \sin(kh \cos \theta), \quad (5.7)$$

где $k = 2\pi/\lambda$; h - высота вибратора над экраном, а угол θ отсчитывается от нормали к оси антенной решетки.

В плоскости Н диаграмма направленности линейной антенной решетки может

быть рассчитана по формуле:

$$F_n(\varphi) = \sin(kh \cos \varphi), \quad (5.8)$$

где угол φ отсчитывается от нормали к оси решетки.

Можно отметить, что в настоящее время антенные решетки находят широкое применение. Они используются в бортовых навигационных РЛС, доплеровских измерителях скорости и других устройствах.

5.2. Задание для расчета

5.2.1. По формулам (5.7) и (5.8) рассчитайте ДН в плоскостях Е и Н симметричного полуволнового вибратора над металлическим экраном при $h = 0,25\lambda$.

5.2.2. По формуле (5.7) рассчитайте ДН в плоскости Е синфазной 2-х элементной вибраторной антенной решетки при $d = 0,5\lambda$ и $d = 1,0\lambda$ ($h = 0,25\lambda$).

5.2.3. По формуле (5.7) рассчитайте ДН в плоскости Е синфазной 3-х элементной вибраторной антенной решетки при $d = 0,5\lambda$ и $h = 0,25\lambda$.

5.3. Порядок выполнения работы

5.3.1. Измерить ДН в плоскости Е следующих антенн:

- полуволнового симметричного вибратора;
- двухэлементной синфазной антенной решетки при $d = 0,5\lambda$;
- двухэлементной синфазной антенной решетки при $d = 1,0\lambda$;
- трехэлементной синфазной антенной решетки при $d = 0,5\lambda$.

При измерении ДН воспользоваться методикой, изложенной в п.1.3.1 (см. описание лабораторной работы №1).

Для проведения измерений установите на поворотном устройстве макет исследуемой антенны. Измерьте длину плеч (2l) симметричного вибратора и определите рабочую частоту антенны $f = 0,24C/\lambda$. Установите рабочую частоту на генераторе. Сориентируйте передающую антенну и приемную вибраторную решетку друг на друга. Настройте анализатор спектра С4-27 (или С4-60) на рабочую частоту. Отрегулируйте чувствительность анализатора спектра и мощность генератора таким

образом, чтобы уровень сигнала на индикаторе был удобен для отсчета.

Подключая один, два и три вибратора, снимите ДН антенной решетки.

Результаты измерений сведите в табл.5.1, пронормируйте ДН и постройте их в полярной системе координат.

5.3.2. Измерить ДН в плоскости Н трехэлементной линейной решетки при $d = 0,5\lambda$.

Для этого поверните передающую антенну и приемную антенную решетку в плоскость Н. Снимите ДН антенной решетки по методике, изложенной в п.5.3.1.

Результаты измерений сведите в табл.5.1, пронормируйте ДН и постройте ее в полярной системе координат.

5.3.3. Сравните экспериментальные ДН с расчетными. По графикам определите ширину ДН и уровень боковых лепестков.

Сделайте выводы по работе.

Таблица 5.1

	θ, φ (град)				
Симметричный вибратор	$F(\theta)$				
2-х элементная антенная решетка ($d = 0,5\lambda$)	$F(\theta)$				
2-х элементная антенная решетка ($d = 1,0\lambda$)	$F(\theta)$				
3-х элементная антенная решетка ($d = 0,5\lambda$)	плоскость Е $F(\theta)$				
	плоскость Н $F(\theta)$				

Литература

1. Нечаев Е.Е. Слабонаправленные антенны и линейные антенны бегущей волны. Часть 1, Учебное пособие, М., МГТУГА, 1997, 120с.

Контрольные вопросы

1. Запишите выражение для множителя синфазной решетки из идентичных изотропных излучателей ([1], стр.68).
2. Сформулируйте теорему перемножения диаграмм направленности ([1], стр.66)
3. С чем связано появление побочных главных максимумов в ДН антенной решетки ([1], стр.71-72)?
4. Расскажите о способах подавления побочных главных максимумов антенной решетки ([1], стр.72-73).
5. Запишите Формулу для расчета углового положения главного максимума ДН антенной решетки ([1], стр.69).
6. Запишите Формулу для расчета углового положения побочных главных максимумов ДН антенной решетки ([1], стр.74).
7. Как влияет на ДН антенной решетки амплитудное и фазовое распределение токов возбуждения её элементов ([1], стр.76-78)?
8. Поясните влияние ДН элемента решетки на ДН антенны в целом ([1], стр.73).