

**УЗБЕКСКОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ  
ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ**

Факультет Радиотехники, Радиосвязи и Телерадиовещания

**Методическое указание к виртуальной лабораторной работе  
“МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРАВЛЕННЫХ СВОЙСТВ АНТЕННЫХ  
РЕШЕТОК С НЕРАВНОМЕРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ”**  
по дисциплинам: “Распространение радиоволн и антенно-фидерные  
устройства” и “Антенны и устройства СВЧ”

Ташкент 2006

Данное методическое указание предназначено для студентов, изучающих курсы “Распространение радиоволн и Антенно-фидерные устройства” и “Антенны и устройства СВЧ” по направлениям образования: “Телевидение, радиосвязь и радиовещание” и “Радиотехника”.

Программа курса “Распространение радиоволн и Антенно-фидерные устройства” содержит 34 часа лекций, 34 часа упражнений и 16 часов лабораторных работ, а программа курса “Антенны и устройства СВЧ” – 30 часов лекций и 16 часов лабораторных работ.

Настоящая виртуальная лабораторная работа рассчитана на выполнение в течение двух часов.

Данная работа предназначена для студентов, изучающих теорию антенных решеток, и может быть полезна при работе над выпускными квалификационными работами и магистерскими диссертациями.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Ознакомление с принципом действия линейных антенных решеток поперечного излучения.
2. Изучение влияния амплитудно-фазового распределения в излучающих элементах на результирующую диаграмму направленности антенной решетки.
3. Анализ экспериментальных диаграмм направленности.

## 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В ряде случаев необходимо, чтобы антенны концентрировали излучаемые ими электромагнитные волны в узкие пучки, т.е. чтобы они обладали узкими диаграммами направленности (ДН), большими значениями коэффициента направленного действия (КНД).

Этого можно достичь при помощи нескольких вибраторов, возбуждаемых так, чтобы их поля в нужном направлении складывались бы в фазе. Иначе говоря, увеличить напряженность поля в одном направлении за счет уменьшения ее в других направлениях можно, применив систему вибраторов, расположенных и возбужденных таким образом, чтобы сдвиг фаз полей от отдельных вибраторов в точке наблюдения из-за несинфазности возбуждения (питания) компенсировался бы пространственным сдвигом фаз из-за разности расстояний до этой точки (рис.2.1).

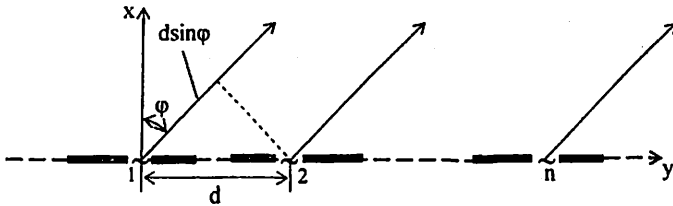


Рис.2.1. Линейная антенная решетка поперечного излучения

Увеличение числа вибраторов антенной системы при правильном выборе фаз токов, возбуждающих вибраторы, и при правильном взаимном расположении вибраторов приводит к увеличению напряженности поля в нужном направлении и к ослаблению ее в других направлениях, т. е. к сужению диаграммы направленности антенны. Очевидно, что получение узких диаграмм направленности путем синфазного сложения полей от отдельных элементов антенны в нужном направлении и создания резко несинфазных полей в других направлениях требует увеличения габаритов антенны.

*Линейной решеткой* называется система идентичных излучателей, центры излучения которых расположены на прямой, называемой осью решетки.

Рассмотрим вначале случай линейной эквидистантной равноамплитудной решетки поперечного излучения, состоящей из  $n$  симметричных вибраторов.

Будем полагать, что токи во всех элементах решетки имеют одинаковую амплитуду ( $I_1=I_2=\dots=I_n=I$ ), фаза же тока в каждом последующем вибраторе отстает от фазы тока в предыдущем на величину  $\psi$ . Таким образом

$$I_2=I \cdot \exp(-i\psi) \dots I_n=I \cdot \exp[i(n-1)\psi].$$

Следовательно, вдоль ряда вибраторов фаза возбуждающего тока изменяется по линейному закону. Таким образом, получилась *равноамплитудная (равномерная) линейная решетка* с линейным законом изменения фазы вдоль оси решетки. Ее характеристика направленности в плоскости  $E$  определяется произведением характеристики направленности одного вибратора на множитель системы

$$f(\varphi) = \frac{\cos(kl \sin\varphi) - \cos kl}{(1 - \cos kl) \cos \varphi} \times \frac{\sin\left[\frac{n}{2}(kd \sin\varphi - \psi)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(kd \sin\varphi - \psi)\right]}$$

где  $k$  – волновое число.

Широкое практическое применение находят антенные решетки с одинаковыми по амплитуде и фазе токами в вибраторах (равномерные синфазные решетки поперечного излучения).

Поля от отдельных вибраторов в направлении  $\varphi = 0$  синфазны и складываются арифметически, так как в направлении нормали к осям вибраторов разность расстояний до точки наблюдения равна нулю, поэтому напряженность, излучаемого антенной, поля максимальна в экваториальной плоскости антенны.

Нормированная характеристика направленности в плоскости  $E$  линейной синфазной эквидистантной равноамплитудной антенной решетки определяется выражением

$$F(\varphi) = \frac{\cos(kl \sin\varphi) - \cos kl}{(1 - \cos kl) \cos \varphi} \times \frac{\sin\left(\frac{n}{2} kd \sin\varphi\right)}{n \sin\left(\frac{1}{2} kd \sin\varphi\right)}$$

При некоторых значениях угла  $\varphi$  пространственный сдвиг фаз между полями соседних вибраторов, равный  $kds \sin\varphi$ , становится таким, что в результате интерференции полей от всех вибраторов суммарное поле обращается в нуль. Направления нулевого излучения определяются из условия равенства нулю числителя множителя системы, откуда

$$\varphi_0 = \arcsin [N\lambda/(nd)],$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $N = 1, 2, 3$  и т. д.

Направления максимумов боковых лепестков приближенно можно найти из условия максимума числителя множителя системы, откуда

$$\varphi_{\max} = \arcsin[(2N+1)\lambda/2nd].$$

Линейный закон изменения фазы возбуждающего поля приводит к изменению направления максимального излучения и диаграмма направленности поворачивается обязательно в сторону отставания фазы возбуждающего тока.

Поворот диаграммы направленности, т.е. управление ею путем изменения величины сдвига фаз  $\psi$  по питанию, находит широкое применение.

Очень перспективным направлением в антенной технике является амплитудно-фазовый синтез антенных решеток. В этом случае путем подбора амплитуд токов возбуждения и их фаз на элементах решетки можно сформировать с определенным приближением практически любую диаграмму направленности. Проблема данной задачи состоит в определении зависимости формируемой диаграммы направленности от устанавливаемых на элементах соответствующих значений высокочастотных токов возбуждения.

Во многих случаях излучение антенны за пределами главного лепестка оказывается нежелательным. С этой точки зрения равномерные решетки не являются оптимальными, т.к. обладают довольно значительным излучением в секторе боковых лепестков. Одним из способов уменьшения бокового излучения является переход к неравномерному – спадающему к краям амплитудному распределению.

В принципе, при этом имеется возможность выбрать такое распределение амплитуд токов в излучателях, что боковых лепестков вообще не будет. Таким свойством обладают решетки с биномиальным распределением амплитуд токов и с расстоянием между излучателями  $d \leq \lambda/2$ ; для синфазных решеток  $d$  может равняться  $\lambda/2$ ; при  $\psi_1 \neq 0$   $d$  должно быть меньше  $\lambda/2$ .

Соотношение амплитуд токов в излучателях биномиальной решетки определяется тем этажом в пирамиде, номер которого на единицу меньше числа излучателей в решетке:

|                     | № этажа |
|---------------------|---------|
| 1 1                 | 1       |
| 1 2 1               | 2       |
| 1 3 3 1             | 3       |
| 1 4 6 4 1           | 4       |
| 1 5 10 10 5 1       | 5       |
| 1 6 15 20 15 6 1    | 6       |
| 1 7 17 31 31 17 7 1 | 7       |
| и т.д.              |         |

Каждую из этих решеток можно представить состоящей из двух решеток, стоящих в пирамиде строчкой выше, центры которых сдвинуты на расстояние между излучателями  $d$ . Тогда по теореме перемножения ДН рассматриваемой решетки будет являться произведением ДН вышестоящей решетки на ДН системы двух излучателей, расположенных на расстоянии, меньшем или равном  $\lambda/2$ . Последняя при любом значении сдвига фаз по питанию  $\psi$  имеет только один лепесток. Применяя теорему перемножения и для определения ДН

вышестоящей решетки, приходим к выводу, что ДН любой решетки с биномиальными амплитудами токов может быть получена из ДН пары излучателей, расположенных на расстоянии  $d \leq \lambda/2$  и имеющих равные амплитуды токов, путем ее возведения в степень. Показатель степени равен номеру этажа в пирамиде, в котором размещаются биномиальные коэффициенты, определяющие распределение амплитуд токов в излучателях рассматриваемой решетки. А так как исходная ДН состоит из одного лепестка, то и ДН любой «биномиальной» решетки не будет иметь боковых лепестков.

Использование биномиальных решеток весьма заманчиво, однако из приведенной пирамиды видно, что при этом соотношения токов в излучателях весьма велики. Поэтому объем, занимаемый решеткой, используется расточительно. На рис.2.2 приведены ДН линейных решеток, состоящих из пяти синфазных излучателей, но имеющих различные амплитудные распределения.

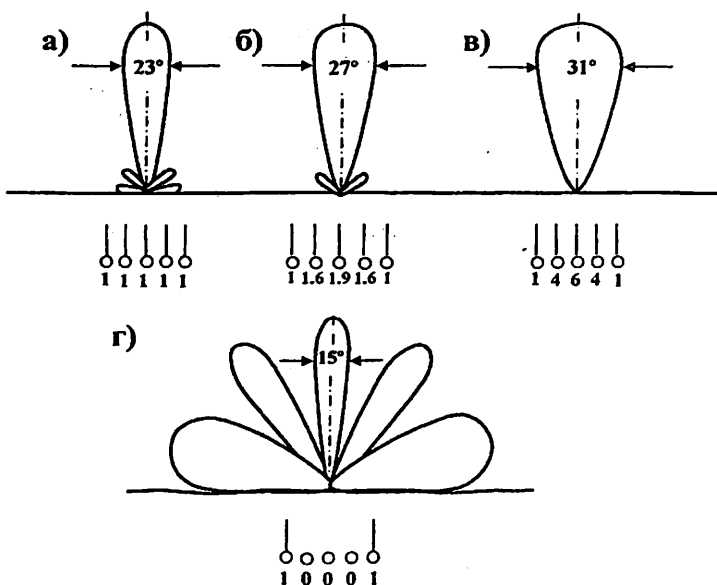


Рис.2.2. ДН линейной синфазной решетки из 5 вибраторов с  $d=0.5\lambda$  при различных амплитудных распределениях [а – равномерном; б – оптимальном; в – биномиальном; г – “сверхнаправленном” (возбуждены только крайние вибраторы)].

Эти ДН показывают, что биномиальная решетка дает самую широкую ДН. По мере приближения распределения амплитуд к равномерному основной лепесток ДН сужается, но одновременно возрастает уровень бокового

излучения. Имеется определенное распределение, которое называется оптимальным. Все боковые лепестки ДН оптимальной решетки имеют одинаковую амплитуду. Самый узкий лепесток дает решетка, в которой возбуждены только крайние излучатели, однако при этом его трудно считать основным.

*Антенные решетки с экспоненциально спадающей амплитудой.* Экспоненциальное спадание амплитуд имеет место в решетках, питаемых по последовательной схеме, при одинаковой связи излучателей с линией. Близко к экспоненциальному также амплитудное распределение в коротких антеннах осевого излучения.

Влияние экспоненциального спадания амплитуды вдоль решетки проявляется в расширении основного лепестка ДН, в увеличении бокового излучения и в заплывании нулей в ДН. КНД с увеличением ослабления уменьшается, что справедливо как для непрерывных систем, так и для решеток. Эти закономерности справедливы и в том случае, если непрерывная система или решетка состоит из направленных излучателей.

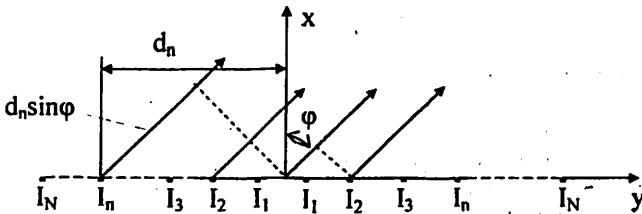
*Синфазные антенные решетки с оптимальной ДН.* Характеристика направленности синфазной линейной решетки с симметричным относительно ее середины амплитудным распределением при четном числе излучателей определяется выражением

$$F_{2N}(\varphi) = \sum_{n=1}^N I_n \cos(kd_n \sin\varphi),$$

а при нечетном числе излучателей – выражением

$$F_{2N+1}(\varphi) = \sum_{n=0}^N I_n \cos(kd_n \sin\varphi),$$

где  $I_n$  – ток в  $n$ -м излучателе,  $d_n$  – расстояние от излучателя до середины решетки (рис.2.3).



a)

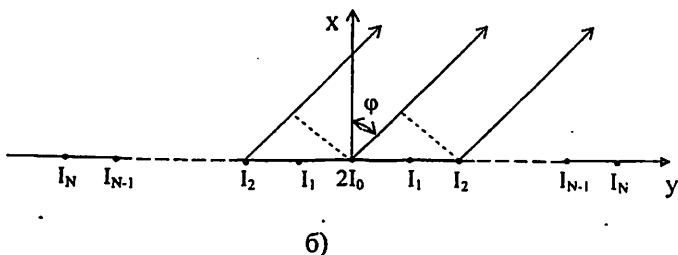


Рис.2.3. К расчету оптимальных линейных решеток  
(а - четное число излучателей; б - нечетное число излучателей)

В случае эквидистантных решеток для четного количества излучателей

$$d_n = (2n-1)/2d,$$

а при нечетном количестве излучателей

$$d_n = n \cdot d.$$

Тогда характеристики направленности антенной решетки определяются выражениями:

для четного числа излучателей

$$F_{2N}(\varphi) = \sum_{n=1}^N I_n \cos \left( \frac{2n-1}{2} kd \sin \varphi \right),$$

для нечетного числа излучателей

$$F_{2N+1}(\varphi) = \sum_{n=0}^N I_n \cos ( nkd \sin \varphi ).$$

Нумерация излучателей проведена от середины решетки, а угол  $\varphi$  отсчитывается от перпендикуляра к оси решетки.

Дольф показал, что «оптимальную» ДН имеют решетки (при  $d \geq \lambda/2$  решетки оказываются синфазными), у которых выражения для характеристики направленности представляют собой полиномы Чебышева.

Под оптимальной ДН понимается такая ДН из всех возможных для данной решетки, у которой при заданной ширине главного лепестка уровень боковых лепестков минимален или при заданном уровне боковых лепестков ширина главного лепестка минимальна.



### 3. ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

3.1. Предварительно необходимо ознакомиться с конструкцией линейной антенной решетки поперечного излучения, методами формирования диаграммы направленности решетки, способами управления ее направленными свойствами.

3.2. Ввести в программу свои фамилию, имя и номер группы, получить номер варианта исследований.

3.3. Задать исходные данные на проведение исследований: число элементов в решетке, относительное межэлементное расстояние.

3.4. Задать параметры и вид исследований: угловой сектор, шаг изменения угловой координаты, систему координат отображения результирующей ДН.

3.5. Задать один из методов формирования результирующей ДН: амплитудный, фазовый, амплитудно-фазовый.

3.6. Получить для заданного распределения результирующую ДН линейной антенной решетки.

3.7. Зарисовать ДН, сделать выводы.

### 4. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Для начала выполнения работы необходимо зарегистрироваться: ввести в поля первого окна программы (рис.4.1) номер Вашей учебной группы, свои фамилию, имя, отчество. Здесь же необходимо получить номер варианта исследований. Без выполнения этих действий кнопка «Далее» не будет активирована, и Вы не сможете провести исследования.

4.2. После регистрации и получения номера варианта исследований, путем нажатия на кнопку «Далее» активируется второе окно программы (рис.4.2). В этом окне показана структура линейной антенной решетки, выражения для характеристики направленности решетки. Здесь же производится установка начальных данных для исследований: количество элементов в решетке и значения относительных межэлементных расстояний.

После их установки следует нажать кнопку «Далее» для перехода в следующее окно программы.

4.3. Третье окно программы (рис.4.3) является основным, где задаются параметры исследований отображения формируемой ДН, методы формирования: только с помощью амплитуд токов возбуждения, только их фаз, или одновременного изменения и амплитуд, и фаз токов.

После установки параметров необходимо нажать кнопку «Далее», чтобы получить результирующую ДН исследуемой решетки.

4.4. В последнем окне программы (рис.4.4) выдается результирующая ДН решетки с заданными параметрами возбуждения.

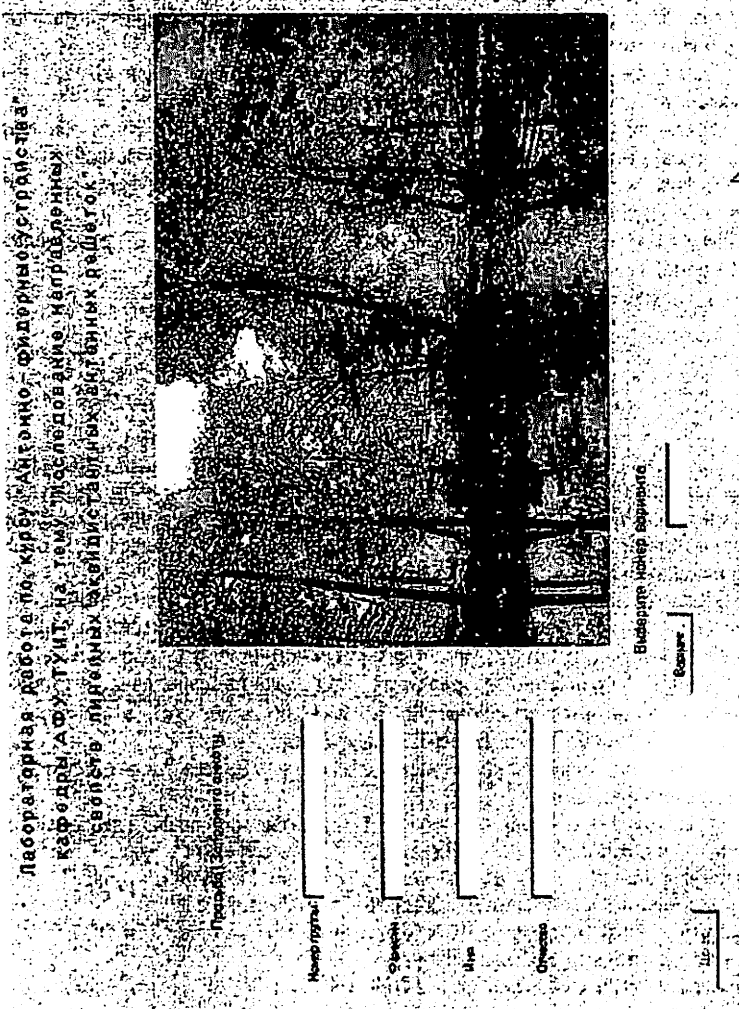
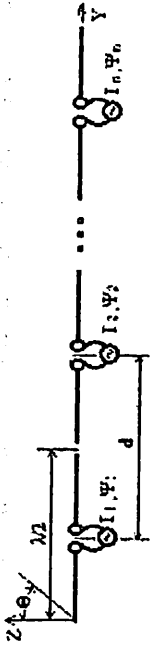


Рис. 4.1. Первое окно виртуальной лабораторной работы

Исходные данные на выполнение лабораторной работы

Схема антенной решетки



№ числа элементов  $\frac{5}{2}$

d/λ  $\frac{0.5}{1}$

относительное максимальное расстояние

Рассчитать формула характеристика направленности после дельта антенной решеткой

$$D(\theta) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N I_n e^{j(n-1)kd \sin \theta} \right|^2$$

$$D(\theta) = \frac{1}{N^2} \left| \sum_{n=1}^N I_n e^{j(n-1)kd \sin \theta} \right|^2$$

$$D(\theta) = \frac{1}{N^2} \left| \sum_{n=1}^N I_n e^{j(n-1)kd \sin \theta} \right|^2$$

где  $I_n$  - амплитуда тока элемента

$\psi_n$  - фаза тока элемента

расстояние между элементами

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$  (волновое число)

$d$  - расстояние между элементами

Дальше

Рис. 4.2. Второе окно виртуальной лабораторной работы

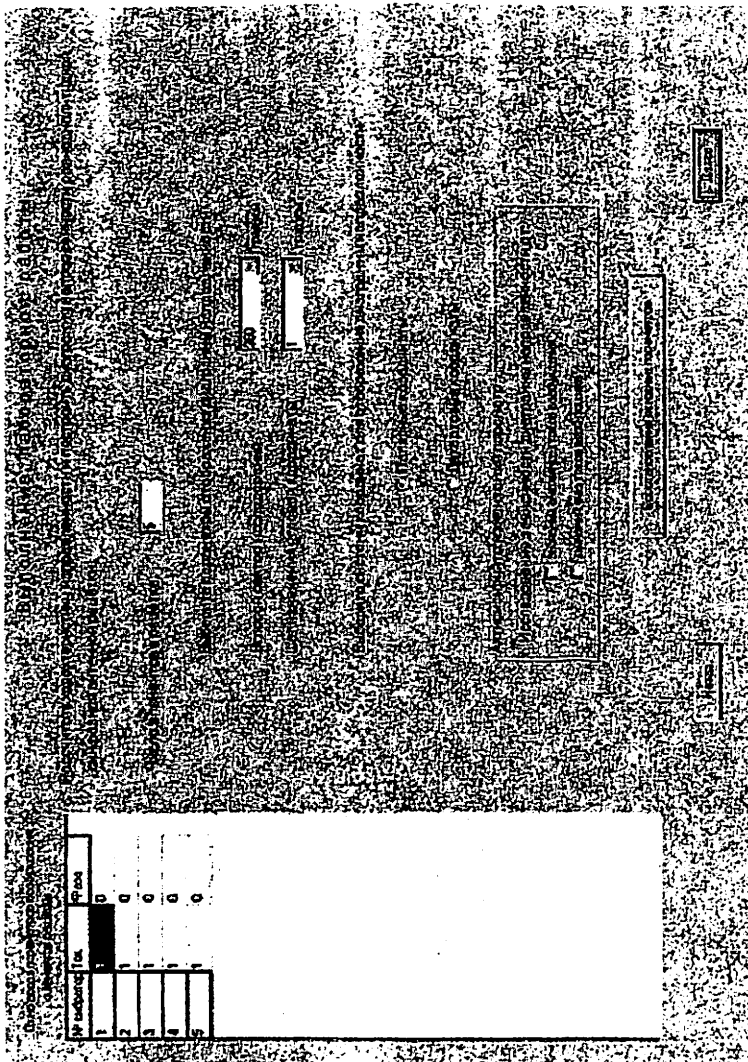


Рис. 4.3. Третье окно виртуальной лабораторной работы

## 5. УКАЗАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Задать одинаковые для всех элементов решетки амплитуды токов возбуждения, а фазовый сдвиг по питанию равный нулю, т.е. провести исследование равноамплитудной синфазной антенной решетки.

Получить и зарисовать результирующую ДН.

5.2. Задать равномерное амплитудное распределение на элементах решетки, и фазовый сдвиг по питанию, заданный преподавателем.

Получить и зарисовать результирующую ДН.

Примечание: произвести исследования для нескольких вариантов фазового сдвига.

5.3. Задать неравномерное амплитудное распределение на элементах решетки, заданное преподавателем, при фазовом сдвиге по питанию равным нулю.

Получить и зарисовать результирующую ДН.

Примечание: произвести исследования для нескольких вариантов амплитудного распределения.

5.4. Задать неравномерное амплитудное распределение на элементах решетки, и фазовый сдвиг тока, заданные преподавателем.

Получить и зарисовать результирующую ДН.

Примечание: произвести исследования для нескольких вариантов амплитудного распределения.

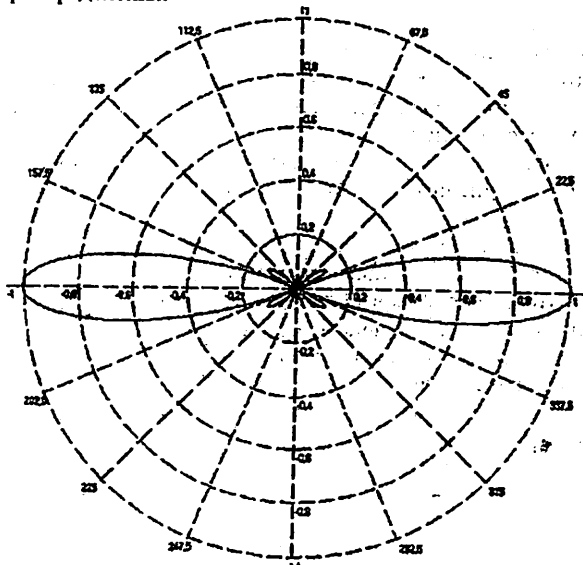


Рис. 4.4. Результирующая диаграмма направленности антенной решетки в полярной системе координат

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

6.1. Эскиз линейной эквидистантной антенной решетки поперечного излучения и связанную с ней систему координат с указанием параметров возбуждения.

6.2. Выражения для характеристики направленности равноамплитудной синфазной и фазированной антенных решеток.

6.3. Заданные амплитудно-фазовые распределения и соответствующие им результирующие ДН антенных решеток.

6.4. Значения ширины главного лепестка по уровню нулевого излучения  $2\phi_0$  и по половинной мощности  $2\phi_{0.5}$ .

6.5. Основные выводы по результатам исследований.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Что называется линейной эквидистантной антенной решеткой поперечного излучения?

7.2. Каким выражением определяется характеристика направленности линейной синфазной антенной решетки поперечного излучения? Объясните значение каждого множителя характеристики направленности.

7.3. Как зависят направленные свойства линейной антенной решетки поперечного излучения от числа элементов и межэлементных расстояний?

7.4. Что происходит с результирующей диаграммой направленности линейной антенной решетки поперечного излучения при изменении амплитудного распределения вдоль нее?

7.5. Какие методы управления результирующей диаграммой направленности линейных антенных решеток поперечного излучения Вы знаете?

7.6. Чем, в основном, определяется характеристика направленности линейной антенной решетки поперечного излучения?

7.7. На что влияет фазовый сдвиг между токами возбуждения элементов линейной антенной решетки поперечного излучения?

7.8. Назовите условия применимости теоремы перемножения характеристик направленности.

7.9. Как зависят направленные свойства линейной антенной решетки от типа ее отдельного элемента?

7.10. Каким образом можно уменьшить уровень боковых лепестков в диаграмме направленности линейной антенной решетки поперечного излучения?

7.11. Какая диаграмма направленности называется оптимальной? Назовите условия оптимальности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства. – М.: Радио и связь, 1972.
2. Кочержевский Г.Н., Ерохин Г.А., Козырев Н.Д. Антенно-фидерные устройства. – М.: Радио и связь, 1989.
3. Фрадин А.З. Антенно-фидерные устройства. – М.:Связь, 1972.
4. Дабкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. – М.: Советское радио, 1974.
5. Ерохин Г.А., Чернышев О.В. и др. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. – М.:Радио и связь, 1996.
6. Ликонцев Д.Н. Антенно-фидерные устройства: Конспект лекций. –Т.: ТУИТ, 2002.
7. Ерохин Г.А., Чернышев О.В. и др. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. – М.:Радио и связь, 2004.
8. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование антенно-фидерных устройств. – М.-Л.: Энергия, 1966.

Методическое руководство к виртуальной лабораторной работе “Моделирование направленных свойств антенных решеток с неравномерным возбуждением” по дисциплинам “Распространение радиоволн и Антенно-фидерные устройства” и “Антенны и устройства СВЧ” рассмотрено на заседании кафедры АФУ (протокол № от 2006 года) и рекомендовано к печати.  
Отв. редактор доц. Ликонцев Д.Н.  
Составитель: и.о.доц. Губенко В.А.  
Редакционно-корректорная комиссия:  
редактор доц. Ликонцев Д.Н.  
корректор асс. Васильева Т.В.

Работа рекомендована ММС ТУИТ  
(протокол № от 2006 г.)  
Бумага офсетная. Заказ № 154  
Тираж. 52  
Отпечатано в типографии ТУИТ  
Ташкент 700084, ул. А. Темура – 108