

Министерство образования и науки РФ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧ и КР)

Утверждаю  
Зав. каф. СВЧ и КР  
\_\_\_\_\_ С.Н. Шарангович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ В РАСКРЫВЕ  
АНТЕННЫ НА ЕЁ ДИАГРАММУ НАПРАВЛЕННОСТИ**

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	3
2. Цель работы.....	3
3. Некоторые вопросы теории антенн .....	3
3.1. Диаграмма направленности апертурных антенн .....	3
3.2. <i>E</i> - и <i>H</i> -секториальные рупорные антенны .....	5
3.3. Рупорно-линзовая антенна .....	7
3.4. Диаграммы направленности рупорных и рупорно-линзовых антенн.....	8
4. Описание экспериментальной установки .....	9
5. Содержание работы .....	11
5.1. Краткая характеристика работы .....	11
5.2. Расчётное задание .....	11
5.3. Порядок выполнения работы .....	12
6. Содержание отчёта .....	12
7. Контрольные вопросы .....	12
8. Список литературы .....	13
Приложение 1. Генератор ГЗ-14А .....	14
Приложение 2. Измеритель ФК2-18 .....	16
Приложение 3. Усилитель У2-4А .....	17
Приложение 4. Программа расчёта диаграммы направленности по данным измерений.....	18

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Лабораторная работа «Исследование влияния распределения поля в раскрыве антенны на её диаграмму направленности» поясняет тот факт, что поле излучения антенны является результатом интерференции полей от элементарных участков раскрыва, т.е. зависит от амплитуды и фазы полей на этих участках. Для лучшего усвоения и понимания работы в описании приведены краткие положения из теории антенн.

## 2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование распределения амплитуды и фазы напряженности электрического поля (АФР) в раскрыве апертурной антенны и его влияния на диаграмму направленности, а также ознакомление с методами измерения амплитуды и фазы поля в диапазоне СВЧ. Исследование проводится на примерах *H*- и *E*-секториальных рупоров и рупорно-линзовой антенны.

## 3. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ АНТЕНН

### 3.1. Диаграмма направленности апертурных антенн

Апертурными называют антенны, у которых излучение происходит через некоторую воображаемую поверхность, называемую апертурой или раскрывом антенны. Апертурными являются волноводные, рупорные, зеркальные и линзовые антенны. Поле излучения апертурной антенны описывается формулой Кирхгофа

$$\dot{E}(M) = \frac{j}{2\lambda} (1 + \cos \theta) \iint_S \dot{E}(S) \frac{e^{-jkr}}{r} dS, \quad (3.1)$$

где  $E(M)$  – напряженность электрического поля в произвольной точке  $M$ , находящейся в дальней зоне антенны (рис. 3.1);

$\lambda$  – длина волны;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число;

$\theta$  – угол между нормалью к раскрыву антенны и направлением на точку  $M$ ;

$S$  – площадь раскрыва антенны;

$E(S)$  – напряженность электрического поля на раскрыве антенны;

$r$  – расстояние от элемента  $dS$  раскрыва антенны до точки  $M$ .

В дальней зоне лучи, проведенные из разных точек антенны в точку наблюдения можно считать параллельными. Граница дальней зоны при максимальной фазовой погрешности  $\pi/8$  определяется условием

$$r \geq \frac{2(L_1 + L_2)^2}{\lambda}, \quad (3.2)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – максимальные размеры апертур передающей и приёмной антенн. Зависимость амплитуды поля излучения антенны от угловых координат точки

наблюдения называется амплитудной диаграммой направленности антенны (ДН). В дальнейшем слово «амплитудная» будем опускать.

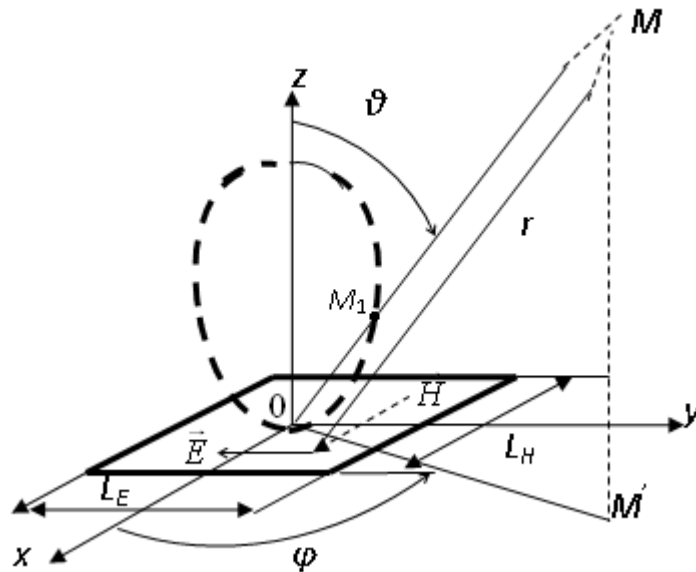


Рис. 3.1 – К определению поля излучения антенны

На рисунке 3.1 изображён прямоугольный раскрыв  $S$  некоторой антенны с размерами  $L_E$  и  $L_H$ , (т.е. размерами в направлении  $E$ - и  $H$ -векторов),  $\theta$  и  $\varphi$  – угловые координаты точки  $M$ , точка  $M'$  – проекция точки  $M$  на плоскость  $xoy$ . Пунктирной линией условно показана возможная ДН в плоскости  $yoz$  в полярной системе координат. Амплитуда поля на поверхности сферы постоянного радиуса в направлении на точку  $M$  пропорциональна длине отрезка  $OM_1$  диаграммы направленности.

Если максимальное значение ДН равно единице, то такая диаграмма называется нормированной. Как видно из формулы (3.1), ДН антенны зависит от распределения амплитуды и фазы (АФР) поля  $E$  ( $S$ ) на раскрыве  $S$ , а также от формы и геометрических размеров раскрыва. Представим поле на раскрыве в виде

$$\dot{E}(S) = E_0 f(x, y) e^{j\Phi(x, y)}, \quad (3.3)$$

где  $E_0$  – амплитуда поля возбуждения,

$f(x, y)$  – функция распределения амплитуды поля на раскрыве,

$\Phi(x, y)$  – функция распределения фазы поля на раскрыве.

Для антенн с прямоугольным раскрывом в большинстве случаев выполняются соотношения

$$f(x, y) = f_1(x) \cdot f_2(y) \quad \text{и} \quad \Phi(x, y) = \Phi_1(x) + \Phi_2(y), \quad (3.4)$$

т.е. распределения поля по осям  $x$  и  $y$  взаимно независимы и описываются в общем случае различными функциями. Пространственная ДН антенны характеризуется двумя главными сечениями: сечением координатной плоскостью  $xoz$  ( $H$ -плоскостью) и сечением координатной плоскостью  $yoz$  ( $E$ -плоскостью).

Подставляя (3.3) в (3.1) и учитывая (3.4), получим следующие выражения для ненормированных ДН антенны в главных сечениях:

$$F_{xoz}(\theta) = \frac{(1 + \cos \theta)}{2} \left| \int_{-L_H/2}^{L_H/2} f_1(x) e^{jkx \sin \theta} e^{j\Phi_1(x)} dx \right|, \quad (3.5)$$

$$F_{yoz}(\theta) = \frac{(1 + \cos \theta)}{2} \left| \int_{-L_E/2}^{L_E/2} f_2(y) e^{jky \sin \theta} e^{j\Phi_2(y)} dy \right|. \quad (3.6)$$

Множитель  $(1 + \cos \theta)/2$  в формулах (3.1), (3.5), (3.6) представляет собой ДН элементарной площадки раскрыва – элемента Гюйгенса, а оставшаяся часть является, так называемым множителем раскрыва антенны.

### 3.2. *E*- и *H*-секториальные рупорные антенны

Рупорная антенна – это постепенно расширяющийся волновод. Протекающие по стенкам рупора высокочастотные токи создают внутри рупора и на его раскрыве электромагнитное поле, напоминающее по структуре поле в волноводе. В раскрыве рупора образуется волновой фронт, каждая точка которого в соответствии с принципом Гюйгенса, является источником элементарной сферической волны. Поля, излучённые точками раскрыва антенны, складываются в пространстве с учётом их амплитуд и фаз (интерferируют), образуя поле излучения рупорной антенны.

*H*-секториальный рупор (*H*-рупор) образуется путем плавного расширения широкой стенки  $a$  прямоугольного волновода при неизменной величине его узкой стенки  $b$  (рис. 3.2), при этом плоская волна в волноводе преобразуется в цилиндрическую волну в рупоре. Напомним, что характер волны (плоская, цилиндрическая или сферическая) определяется ее волновым (фазовым) фронтом – поверхностью постоянных фаз.

В раскрыве *H*-рупора имеет место цилиндрический волновой фронт с косинусоидальным распределением амплитуд и квадратичным распределением фаз вдоль оси  $x$  и постоянными амплитудами и фазами вдоль оси  $y$ .

$$f_1(x) = \cos\left(\frac{\pi x}{L_H}\right), \quad \Phi_1(x) = \frac{-kx^2}{R_H}; \quad f_2(y) = \text{const}=1, \quad \Phi_2(y) = 0; \quad (3.7)$$

где  $R_H$  – длина *H*-рупора (рис. 3.2).

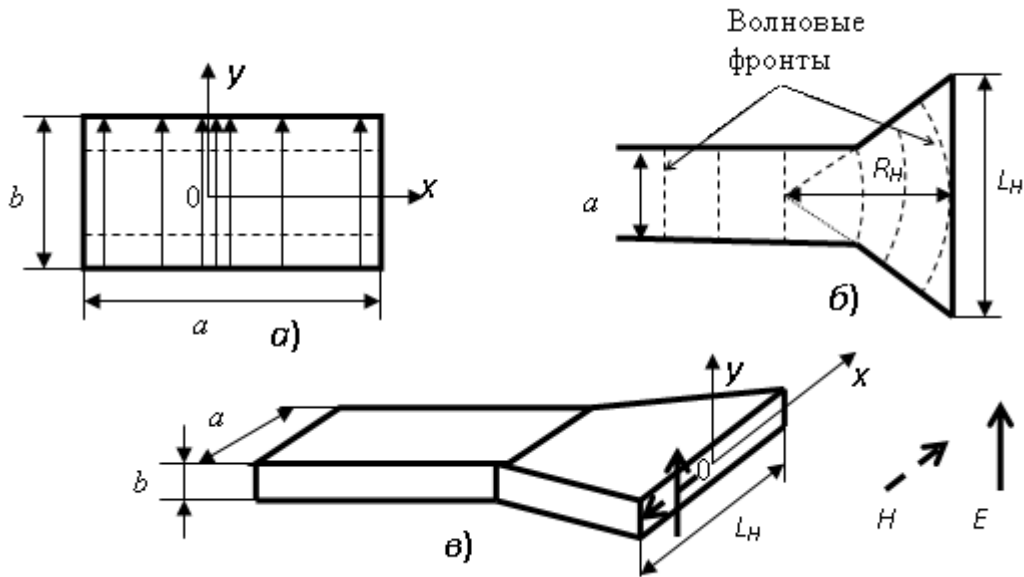
Фазы  $\Phi_1(x)$  и  $\Phi_2(y)$  определяются по отношению к фазе поля в центре раскрыва (точка  $x = y = 0$ ), где она принимается за нуль.

*E*-секториальный рупор (*E*-рупор) образуется путем плавного расширения узкой стенки  $b$  прямоугольного волновода при неизменной величине широкой стенки  $a$  (рис. 3.3), при этом происходит такое же преобразование волновых фронтов, как и в *H*-рупоре.

Распределение напряженности электрического поля  $E(S)$  на раскрыве *E*-рупора описывается выражениями:

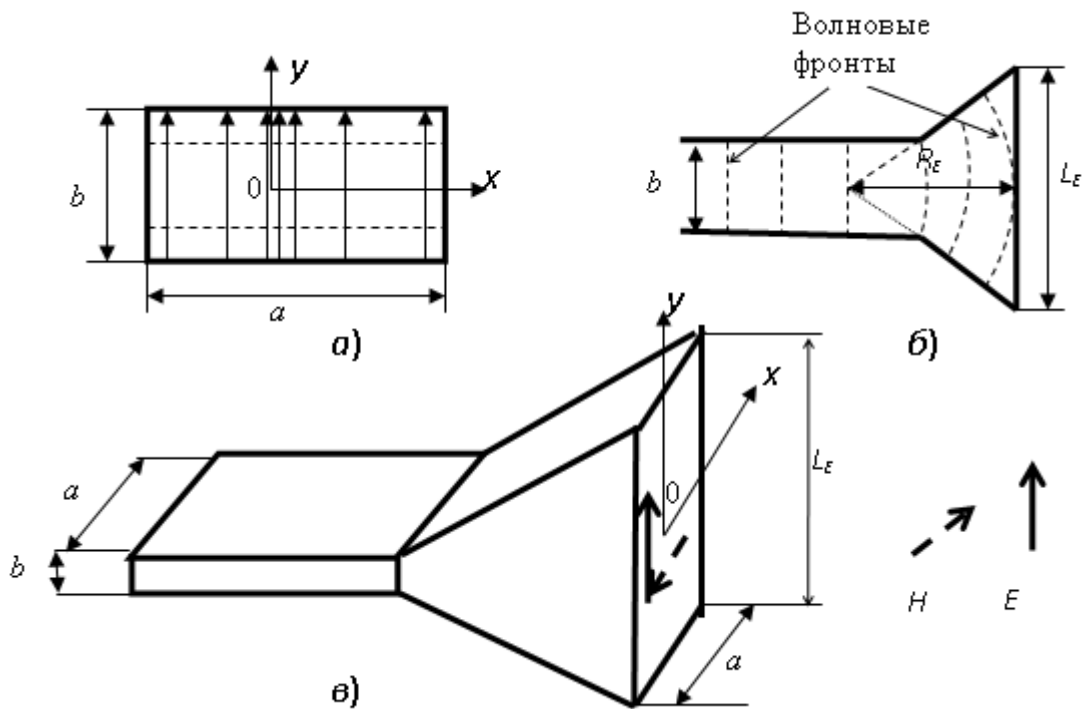
$$f_1(x) = \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right), \Phi_1(x) = 0; f_2(y) = \cos t = 1, \Phi_2(y) = \frac{-ky^2}{R_E}; \quad (3.8)$$

где  $R_E$  – длина  $E$ -рупора (рис. 3.3).



а) волновод со структурой полей  $E$  и  $H$  для волны  $H_{10}$ ; б) фазовые фронты в волноводе и рупоре,  $R_H$  – длина рупора; в) конструкция  $H$ -рупора.

Рис. 3.2 –  $H$ -секториальный рупор



а) волновод со структурой полей  $E$  и  $H$  для волны  $H_{10}$ ; б) фазовые фронты в волноводе и рупоре,  $R_E$  – длина рупора; в) конструкция  $E$ -рупора.

Рис. 3.3 –  $E$ -секториальный рупор

Из формул (3.7), (3.8) следует, что чем меньше длины рупоров ( $R_E$  и  $R_H$ ), тем больше изменение фазы по раскрытию, которое происходит по квадратичному закону. Эти изменения называют квадратичными фазовыми искажениями. Наличие значительной несинфазности поля в раскрытии, наблюдаемое у коротких рупоров, может привести к расширению ДН, появлению провала в её центре, росту боковых лепестков и даже к раздвоению ДН. Для получения синфазного поля (плоской волны) в раскрытии рупора применяют радиолинзы.

### 3.3. Рупорно-линзовая антенна

Радиолинзы бывают замедляющие ( $v_\phi < c$ ) и ускоряющие ( $v_\phi > c$ ). Если линза вставлена в раскрытие рупора, то такую антенну называют рупорно-линзовой антенной.

В настоящей работе исследуется замедляющая линза, которая имеет вид отрезка гиперболического цилиндра, выполненного из диэлектрика с малыми потерями: полистирола, плексигласа или фторопласта (рис. 3.4).

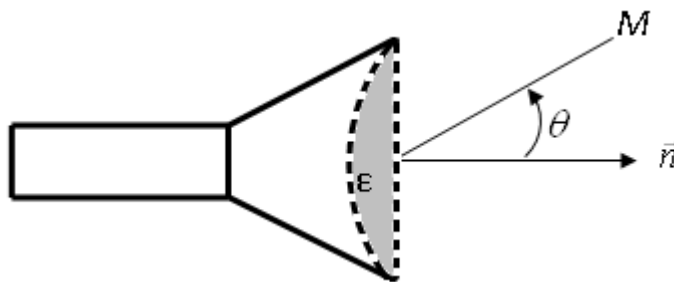
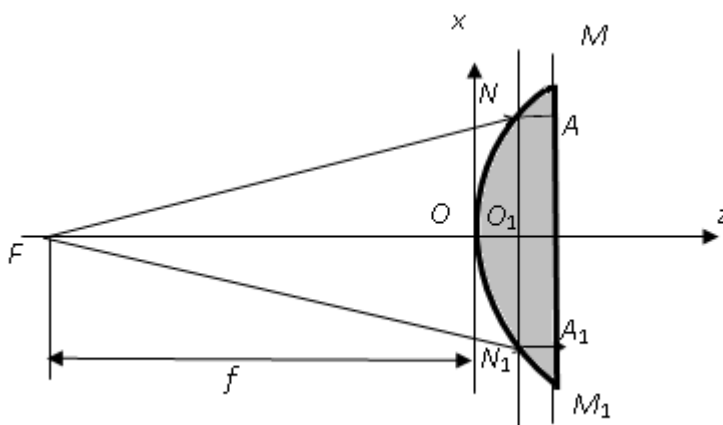


Рис. 3.4 – Схема рупорно-линзовой антенны

Назначение линзы – превратить цилиндрический фронт волны в раскрытии секториального рупора в плоский. Ход лучей в линзе и принцип её действия пояснён на рис. 3.5.



$MM_1$  – плоскость раскрытия линзы;  $f$  – фокусное расстояние линзы.

Рис. 3.5 – Ход лучей в замедляющей линзе

Условие синфазности поля в раскрыве рупорно-линзовой антенны  $MM_1$  (или в любой плоскости  $NN_1$ , параллельной раскрыву) заключается в равенстве отрезков времени  $t$ , затрачиваемых электромагнитной волной на прохождение пути от фокусной линии линзы, совпадающей с фазовым центром рупора, до плоскости раскрыва или ей параллельной

$$t = \frac{FO}{c} + \frac{OO_1}{v_\phi} = \frac{FN}{c}; \quad FN = \sqrt{(f+z)^2 + x^2}; \quad OO_1 = z; \quad O_1N = x; \quad FO = f,$$

где  $c$  – скорость света;

$v_\phi = c/n$  – фазовая скорость электромагнитной волны в линзе,

$n = \sqrt{\epsilon_r}$  – показатель преломления линзы,

$\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость линзы,

$x$  и  $y$  – координаты произвольной точки  $N$  на поверхности линзы.

Таким образом, условие синфазности поля в плоскости  $NN_1$ , а также в плоскости раскрыва может быть записано в следующем виде:

$$\frac{f}{c} + \frac{zn}{c} = \frac{\sqrt{(f+z)^2 + x^2}}{c}.$$

Это уравнение приводится к уравнению гиперболы

$$\left[ \frac{z(n+1)}{f} + 1 \right]^2 - \frac{x^2(n+1)}{f^2(n-1)} = 1. \quad (3.9)$$

Всякая диэлектрическая линза, выравнивая фазовое распределение, меняет и амплитудное, концентрируя энергию к центру линзы. Для тонких линз этим часто пренебрегают, считая амплитудное распределение таким же, как у рупора, а фазовое – постоянным. В данной работе АФР определяется экспериментально и по нему рассчитывается ДН.

### 3.4. Диаграммы направленности рупорных и рупорно-линзовых антенн

В самом общем случае, для любых возможных АФР на раскрыве антенны, диаграммы направленности в  $E$ - и  $H$ -плоскостях описываются формулами (3.5) и (3.6). Если распределение фаз на раскрыве является постоянным или его приближённо можно считать таким, то интегралы в этих формулах берутся и нормированные ДН могут быть рассчитаны по следующим формулам:

для равномерного амплитудного распределения

$$F(\theta) = \frac{(1 + \cos \theta)}{2} \left| \frac{\sin \left[ \frac{kL}{2} \sin \theta \right]}{\frac{kL}{2} \sin \theta} \right|, \quad (3.10)$$

для амплитудного распределения вида  $\cos\left(\frac{\pi x}{L}\right)$



$$F(\theta) = \frac{(1 + \cos \theta)}{2} \left| \frac{\cos\left(\frac{kL}{2} \sin \theta\right)}{1 - \left(\frac{kL}{\pi} \sin \theta\right)^2} \right|, \quad (3.11)$$

где  $L$  и  $\theta$  – размер раскрыва антенны и угол в плоскости  $xoz$  или  $yoz$ .

Реально этим случаям соответствуют:

- 1) достаточно длинные рупоры ( $R > L$ ) и такие, что разность хода центрального и крайнего лучей от вершины рупора до раскрыва достаточно мала (меньше  $\lambda/16$ ); при этом максимальная фазовая ошибка на раскрыве равна

$$\Delta\varphi_{\max} = \frac{kL^2}{4R} \leq \frac{\pi}{8}; \quad (3.12)$$

- 2) рупорно-линзовые антенны с косинусоидальным распределением амплитуд и постоянным распределением фаз.

В случае коротких рупоров с учетом квадратичного фазового распределения ((3.7), (3.8)) ДН определяется формулами (3.5) или (3.6), которым можно придать вид:

$$F(\theta) = \frac{(1 + \cos \theta)}{2} \left| \int_{-L/2}^{L/2} f(\xi) e^{-j\left(\frac{k\xi^2}{R}\right)} e^{jk\xi \sin \theta} d\xi \right|, \quad (3.13)$$

где  $f(\xi)$  – распределение амплитуды,  $\xi$  – координата в направлении размера  $L$  ( $x$  или  $y$ ).

Для вычисления ДН по экспериментально измеренным значениям амплитуды и фазы поля в  $N$  точках раскрыва, интеграл в формуле (3.13) может быть вычислен по одной из формул численного интегрирования, например, формуле трапеций:

$$F(\theta) = \frac{(1 + \cos \theta)}{2} \left| u(\xi_0) + u(\xi_N) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} u(\xi_i) \right| \frac{L}{2N}, \quad (3.14)$$

где  $\xi_i = -L/2 + Li/N$ ,  $u(\xi_i) = f(\xi_i) e^{j\Phi(\xi_i)} e^{jk\xi_i \sin \theta}$ .

Пример такой программы в MathCad приведён в Приложении 4.

#### 4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

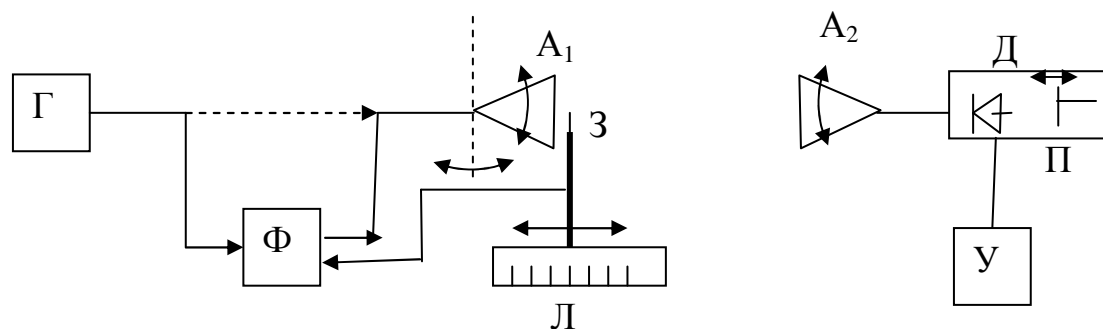
Экспериментальная часть работы включает:

- измерение распределения амплитуд и фаз поля в раскрывах антенн,
- измерение ДН антенн.

На рисунке 4.1 представлена структурная схема экспериментальной установки для выполнения этих задач.

При измерении распределений амплитуд и фаз поля антенна  $A_2$  с присоединёнными к ней приборами не используется. Генератор с помощью коакси-

ального кабеля подсоединяется к измерителю ФК2-18. Внутри измерителя сигнал разделяется на два канала: один сигнал используется в качестве опорного, а второй сигнал поступает на выход прибора. По кабелю этот сигнал подается на вход исследуемой антенны  $A_1$ , в раскрыве которой может перемещаться электрический зонд. Сигнал с зонда по другому кабелю возвращается на измеритель  $\Phi$ , где сравнивается по амплитуде и фазе с опорным. Для наглядности на схеме направление распространения сигналов показано стрелками.



$\Gamma$  – генератор ГЗ-14А,  $\Phi$  – измеритель отношения амплитуд и разности фаз сигналов ФК2-18,  $A_1$  и  $A_2$  – исследуемая и приёмная антенны,  $З$  – подвижный зонд,  $Л$  – линейка,  $Д$  – детекторная секция с коротко замыкающим поршнем  $\Pi$ ,  $У$  – измерительный усилитель У2-4.

Рис.4.1 – Структурная схема экспериментальной установки

Нормальная работа измерителя  $\Phi$  предполагает непрерывный режим работы генератора «НЕПРЕР» и уровень 70–80 мкА сигнала «ОПОРНЫЙ УРОВЕНЬ» индикаторного блока  $\Phi$ . Более подробное описание и правила работы с приборами ГЗ-14А и ФК2-18 приведены в Приложениях 1 и 2.

При измерении диаграмм направленности от генератора следует отключить измеритель  $\Phi$  и подключить антенну  $A_1$  (на рис. 4.1 показано пунктирной стрелкой). Генератор при этом должен работать в режиме «ВНУТР. МАНИП», генерируя высокочастотный сигнал, модулированный по амплитуде низкой частотой (1 кГц). Сигнал, принятый антенной  $A_2$ , детектируется детекторной секцией ( $Д$ ). На выходе детектора высокочастотные составляющие протектированного сигнала отфильтровываются, а низкочастотная составляющая (1 кГц) усиливается и измеряется низкочастотным измерительным усилителем ( $У$ ) (Приложение 3). Детекторная секция включает в себя кроме диода также коротко замыкающий поршень  $\Pi$  для настройки её на частоту генератора по максимуму сигнала на выходе усилителя  $У$ . При измерении ДН антенны  $A_1$ , она поворачивается относительно вертикальной оси и в усилителе  $У$  фиксируется сигнал  $U(\theta)$ , пропорциональный квадрату амплитуды напряженности поля в месте расположения приёмной антенны. Характеристика детектора  $Д$  предполагается при этом квадратичной из-за низкого уровня высокочастотного сигнала. Нормированная ДН антенны  $A_1$  вычисляется по формуле:

$$F(\theta) = \sqrt{\frac{U(\theta)}{U_{\max}}} \quad (4.1)$$

где  $U_{\max}$  – максимальное значение  $U(\theta)$ .

Приёмная антенна представляет собой пирамидальный рупор, который может поворачиваться вокруг горизонтальной оси. Исследуемые антенны – секториальные рупоры, имеют входной волновод квадратного сечения, что позволяет возбуждать их посредством поворота волноводно-коаксиального перехода на  $90^\circ$  как  $H$ -, так и  $E$ -секториальные рупоры. Направление вектора  $\vec{E}$  в волноводе соответствует ориентации возбуждающего штыря в переходе. Все рупоры имеют размеры раскрыва 23мм на 200мм, а длины рупоров соответственно равны: 175мм (короткий № 1), 342 мм (средний № 2), 519 мм (длинный № 3).

Диэлектрическая линза изготовлена из плексигласа ( $\epsilon_r = 2,61$ ,  $n = 1,62$ ) и имеет размеры раскрыва такие же, как у рупоров; криволинейной поверхностью она вставляется в раскрыв рупора.

Для измерения амплитуды и фазы поля в раскрыве антенн служит электрический зонд – несимметричный вибратор, который представляет собой оголенную центральную жилу коаксиального кабеля длиной примерно  $\lambda/4$ . Укрепленный на подвижной каретке, зонд может перемещаться вдоль раскрыва антенны. При этом в нем наводится сигнал, амплитуда и фаза которого пропорциональны амплитуде и фазе вектора  $E$  в данной точке раскрыва. Вертикальное расположение зонда позволяет измерять АФР в раскрывах только  $H$ -рупоров и рупорно-линзовых антенн на их основе.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 5.1. Краткая характеристика работы

Объектами изучения в данной работе являются:  $H$ -рупор, рупорно-линзовая антенна на его основе и  $E$ -рупор. Для них необходимо выполнить следующие теоретические и экспериментальные исследования:

1. Для  $H$ -рупора – измерить АФР на его раскрыве и ДН в  $H$ -плоскости. Результаты сравнить с теоретическими.
2. Для рупорно-линзовой антенны – измерить АФР на её раскрыве и ДН в  $H$ -плоскости. Рассчитать ДН по измеренным амплитудам и фазам по формуле (3.14) и сравнить с экспериментальной ДН.

### 5.2. Расчётное задание

1. Для выбранных по согласованию с преподавателем рупоров и частоте по формуле (3.12) оценить максимальную фазовую ошибку на краю рупора и определить, можно ли считать фазу на раскрыве постоянной при расчёте ДН (допустимая ошибка составляет  $\pi/8$ ).

2. Рассчитать и построить распределение амплитуд и фаз поля на раскрыве рупора, рассматривая его как  $H$ - и  $E$ -секториальный.

3. Рассчитать ДН  $H$ -рупора в  $H$ -плоскости с учетом и без учёта квадратичного фазового распределения, сравнить их и сделать вывод о влиянии квадратичных фазовых искажений на ДН  $H$ -рупора.

4. Повторить п.3 для  $E$ -рупора.

### 5.3. Порядок выполнения работы

С целью уменьшения переключений в схеме, можно рекомендовать следующий порядок выполнения эксперимента:

1. Собрать установку для измерения АФР. Установить на генераторе режим непрерывных колебаний.

2. Провести измерения распределения амплитуд и фаз в раскрыве  $H$ -рупора. Экспериментальные точки нанести на теоретические зависимости и сравнить их.

3. Провести измерения распределения амплитуд и фаз в раскрыве рупорно-линзовой антенны. Построить графики, сравнить с данными п.2 и сделать выводы о влиянии линзы на АФР.

4. Собрать установку для измерения ДН. Установить на генераторе режим внутренней модуляции.

5. Измерить ДН  $H$ -рупора, выполнить её нормировку, нанести экспериментальные точки на расчётную ДН и провести сравнение ДН.

6. Измерить ДН  $E$ -рупора, выполнить её нормировку, нанести экспериментальные точки на расчётную ДН и провести сравнение ДН.

7. Измерить ДН рупорно-линзовой антенны, выполнить её нормировку и построить. По измеренному АФР рассчитать по формуле (3.14) ДН и сравнить с экспериментальной.

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

1. Цель работы, краткие теоретические сведения по рупорным и рупорно-линзовым антеннам.

2. Схему экспериментальной установки, метод измерения амплитуды и фазы поля в раскрыве антенн.

3. Основные расчётные формулы, результаты расчётов и измерений в виде таблиц и графиков.

4. Выводы о влиянии АФР в раскрыве антенны на её ДН, а также о совпадении экспериментальных и теоретических результатов.

## 7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните цель работы и каким образом она достигается.

2. Что такое диаграмма направленности антенны?

3. Как и почему влияет амплитудное распределение поля в раскрыве антенны на её ДН?

4. Как и почему влияет фазовое распределение поля в раскрыве антенны на её ДН?

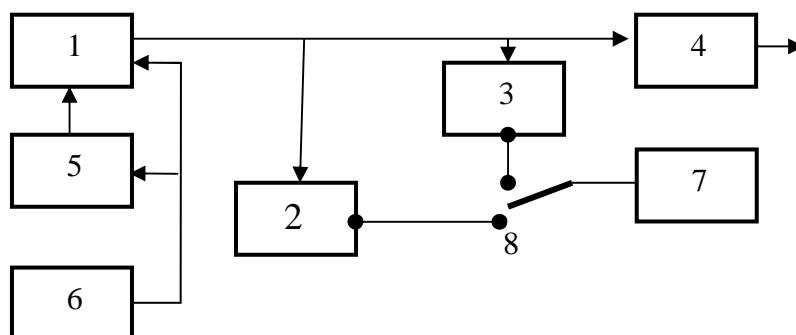
5. Что такое  $E$ -или  $H$ -секториальные рупоры, почему они так называются?

6. Объясните принцип действия рупорно-линзовой антенны.
7. Из какого условия определяется профиль замедляющей линзы?
8. Как изменяется ДН секториальной рупорной антенны, если при неизменном раскрыве  $L$  увеличивать её длину  $R$ ?
9. Как изменяется ДН секториальной рупорной антенны, если при её неизменной длине  $R$  увеличивать размер раскрыва  $L$ ?
10. Как должны изменяться размер раскрыва  $L$  и длина рупора  $R$ , чтобы максимальная фазовая ошибка на раскрыве была постоянной?
11. Объясните методику измерения ДН антенны.
12. Объясните методику определения АФР поля в раскрыве антенны.
13. Какие режимы работы генератора следует устанавливать при измерении АФР и ДН и почему?
14. Поясните устройство и работу прибора ФК2-18. Каков принцип измерения амплитуды и фазы поля в нём заложен?
15. Изобразите и объясните амплитудное и фазовое распределение в раскрыве  $E$ -секториального рупора по осям  $x$  и  $y$ .
16. Изобразите и объясните амплитудное и фазовое распределение в раскрыве  $H$ -секториального рупора по осям  $x$  и  $y$ .
17. Какова форма поверхности линзы и почему? Как толщина линзы зависит от параметров диэлектрика и длины рупора?
18. Почему нужно менять режим работы генератора при переходе от измерения ДН к измерению АФР?

## 8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

## ГЕНЕРАТОР ГЗ-14А



1 – клистронный блок, 2 – волномер, 3 – термистор, 4 – аттенюаторы,  
5 – модулятор, 6 – блок питания, 7 – индикаторный прибор,  
8 – переключатель.

Рис. П 1.1 – Структурная схема генератора ГЗ-14А

Генератор сигналов ГЗ-14А является источником высокочастотных сигналов, калиброванных по частоте и уровню, предназначенный для различных радиотехнических измерений в лабораторных условиях.

### Технические данные генератора

1. Рабочий диапазон частот 7500 – 10400 МГц перекрывается двумя клистрономы К30 (7500 – 9100 МГц) и К29 (8600 – 10400 МГц).
2. Уровень выходной калиброванной мощности  $10^{-4}$  –  $10^{-10}$  Вт, уровень выходной некалиброванной мощности не менее 5 мВт.
3. Генератор может работать в режиме непрерывных и модулированных колебаний; внутренняя модуляция осуществляется симметричными прямоугольными импульсами (меандром) с частотой следования 1 кГц.

### Назначение ручек управления

**ЧАСТОТА** – механическая перестройка частоты клистронов, за счёт изменения объёма резонаторов, являющихся колебательными контурами;  
**КОРРЕКЦИЯ** – настройка на максимум выходной мощности посредством перемещения коротко-замыкающих поршней в волноводах, возбуждаемых клистрономы;  
**ДИАПАЗОН** – механическое переключение выходного тракта к одному из клистронов;  
**НАЧАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ (больше/меньше)** – регулировка мощности аттенюатором на входе калиброванных АТТЕНЮАТОРОВ ВЫХОДА;  
**ОТРАЖАТЕЛЬ** – изменение напряжения на отражателях клистронов для настройки на максимальную мощность;  
**ВОЛНОМЕР** – механическая перестройка частоты внутреннего волномера;

**ТЕРМИСТОР/ВОЛНОМЕР** – переключатель стрелочного прибора из цепи индикации мощности в цепь волномера;

**ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВОЛНОМЕРА** – регулировка чувствительности волномера;

**УСТАНОВКА НУЛЯ ГРУБО** и **ПЛАВНО** – установка нуля стрелочного прибора при индикации мощности;

**РОД РАБОТЫ** – переключатель режимов работы генератора (непрерывный, с внешней модуляцией, с внутренней модуляцией);

**ВЫХОД мВт/мкВт** – переключатель выхода прибора с милливаттного на микроваттный калиброванный; при работе должен находиться в положении «мВт».

Кроме того, на панели расположены:

- два окна, где фиксируется положение ручки **ЧАСТОТА** на каждом диапазоне;
- табличка **ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРА** для грубого определения частоты;
- окно шкалы волномера и стрелочный индикатор для контроля уровня мощности и частоты.

### **Порядок работы с прибором**

1. Включить прибор и дать ему прогреться не менее 5 минут.
2. Ручкой **РОД РАБОТЫ** установить нужный режим работы генератора.
3. По таблице **ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРА** и по шкале **ЧАСТОТА** установить ориентировочно требуемую частоту.
4. Переключить тумблер в положение **ТЕРМИСТОР**.
5. Вывести ручку **НАЧАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ** до упора вправо и установить стрелку индикатора на нуль ручками **УСТАНОВКА НУЛЯ**.
6. Ручку **НАЧАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ** повернуть влево до появления показаний индикатора и ручками **ОТРАЖАТЕЛЬ** и **КОРРЕКЦИЯ** добиться максимальной мощности по показаниям индикаторного прибора.
7. Переключить тумблер в положение **ВОЛНОМЕР** и установить с помощью градуировочного графика шкалу волномера на деление, соответствующее нужной частоте.
8. Ручкой **ЧАСТОТА** подстроить частоту генератора под частоту волномера.
9. Повторяя пп. 6 и 8, убедиться в генерации нужной частоты и максимальной мощности.
10. Ручками **АТТЕНЮАТОРЫ ВЫХОДА** установить достаточный уровень выходной мощности.
11. При изменении режима работы генератора возможны подстройки по частоте и на максимальную мощность.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### ИЗМЕРИТЕЛЬ ФК2-18

#### Краткое описание прибора

Измеритель разности фаз ФК2-18 предназначен для измерения разности фаз и отношения уровней синусоидальных сигналов. Прибор работает на принципе сравнения по амплитуде и фазе двух сигналов: опорного и прошедшего через исследуемый четырехполюсник. При измерении АФР таким четырехполюсником является исследуемая антенна и электрический зонд. Сравнение сигналов осуществляется после двойного гетеродинирования выравниванием опорного сигнала по амплитуде и фазе с измеряемым сигналом. Выравнивание по амплитуде проводится с помощью ступенчатых аттенуаторов, по фазе с помощью ступенчатого фазовращателя и линии с изменяемой длиной. Нормальная работа прибора проходит при уровне опорного сигнала 80 мкА.

#### Инструкция по эксплуатации прибора

1. Установите органы управления в следующие исходные положения:
  - тумблер СЕТЬ – в выключенное положение,
  - переключатель ДИАПАЗОН ЧАСТОТ GHz – в положение «12,05 – 8»,
  - переключатель ОСЛАБЛЕНИЕ dB – в положение «0»,
  - переключатель dB-φ<sup>0</sup> – в положение «30».
2. Порядок работы.
  - 2.1. Включите тумблер СЕТЬ, на передней панели должна загореться индикаторная лампочка.
  - 2.2. Соедините выход генератора со входом ВЧ (расположен на задней стенке прибора). При этом ручка РОД РАБОТЫ генератора должна находиться в положении НЕПРЕР. Регулировкой мощности с выхода генератора по индикатору ОПОРНЫЙ УРОВЕНЬ добейтесь показания «80 мкА».
  - 2.3. Если показания индикатора ОПОРНЫЙ УРОВЕНЬ или стрелочного индикатора по амплитуде или фазе неустойчивы – ручкой СТАБИЛЬНОСТЬ добейтесь стабильных показаний.
  - 2.4. Соедините выход А прибора (БЛОК СВЧ ФК2-18) со входом антенны, а зонд подключите ко входу Б.
  - 2.5. Проведите калибровку прибора для измерения амплитуд поля. Для этого установите зонд в центр раскрыва, ручку АМПЛ в среднее положение и переключателем ОСЛАБЛЕНИЕ (десятки и единицы децибел) установите индикатор на нуль сначала на грубой шкале (30 дБ), а затем и на более точных шкалах (10 и 5 дБ). Точную подстройку проведите ручкой «АМПЛ». В результате амплитуды опорного сигнала и сигнала от центра раскрыва станут равными.
  - 2.6. Перемещая зонд, определите уровень сигнала в точках раскрыва по стрелочному индикатору сначала по точной шкале (5 дБ), а затем по необходимости на более грубых (10 и 30 дБ)
  - 2.7. Проведите калибровку прибора для измерения фаз поля выравниванием фазы опорного сигнала и фазы поля в центре раскрыва. Для этого, установи-



те зонд в центр раскрыва, ручку «ФАЗА  $\varphi^0$ » в среднее положение и ручкой «ДЛИНА ОПОРНОГО КАНАЛА (см)» установите нуль на индикаторе сначала на грубой шкале ( $180^0$ ), а затем и на более точных ( $60^0$ ,  $18^0$  и  $6^0$ ). Точную подстройку проведите ручкой «ФАЗА  $\varphi^0$ ».

2.8. Перемещая зонд, определите фазу сигнала в точках раскрыва по стрелочному индикатору сначала по точной шкале ( $6^0$ ), а затем по необходимости на более грубых ( $18^0$ ,  $60^0$  и  $180^0$ ).

2.9. При значениях фазы, близких к  $180^0$ , показания прибора становятся неустойчивыми и могут изменить знак. Чтобы избежать этого, следует при значениях, близких к  $140^0$ , уменьшить показания индикатора ступенчатым переключателем «ФАЗА  $\varphi^0$ » на значение кратное  $10^0$  и учесть это при отсчёте фазы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### УСИЛИТЕЛЬ У2-4А

Измерительный усилитель У2-4А предназначен для усиления и измерения сигналов звуковой частоты и их отношений.

#### Технические данные усилителя.

1. Диапазон частот 0,15 – 20 кГц, разбит на шесть поддиапазонов.
2. Входное сопротивление прибора: при трансформаторном входе – 600 Ом, при безтрансформаторном – 10 кОм.
3. Усилитель может работать на широкой полосе пропускания (0,15 – 20 кГц) и в пределах узкой полосы каждого из поддиапазонов.
4. Чувствительность усилителя при широкой полосе не ниже 10 мкВ, при узкой полосе не ниже 1 мкВ.
5. Усилитель измеряет отношение напряжений в диапазоне от 0,0001 до 0,1 с погрешностью  $\pm 3\%$  и в диапазоне от 0,1 до 1 с погрешностью  $\pm 2\%$ .

#### Назначение ручек управления.

ОТНОШЕНИЕ – делитель входного напряжения, объединяющий 4 ручки, служит для деления измеряемого напряжения в заданном отношении. В положении «К» проводится калибровка усиления;

ДИАПАЗОН ЧАСТОТ кHz – переключает прибор на широкую или одну из узких полос пропускания;

ЧАСТОТА ПЛАВНО кHz – настройка прибора на частоту в режиме узкой полосы пропускания;

УСИЛЕНИЕ – плавная регулировка коэффициента усиления;

ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬ – изменение избирательности при узкой полосе пропускания;

ИЗМЕРЕНИЕ/КАЛИБРОВКА – переключение стрелочного индикатора с режима измерения на режим калибровки.

### Особенности применения прибора.

Усилитель У2-4А может использоваться для измерения:

- абсолютного значения входного напряжения в микровольтах (усилитель содержит внутренний калибровочный генератор);
- отношения напряжений с помощью прецизионного входного делителя;
- измерения относительной величины входного напряжения, с использованием стрелочного прибора и переключателей ОТНОШЕНИЕ (одна или две ручки слева).

При измерении диаграмм направленности следует использовать третий пункт по следующим причинам:

- ДН характеризует относительное изменение величины поля;
- точность стрелочного прибора при этом вполне достаточна, поскольку погрешность при измерении ДН обусловлена как отражениями от местных предметов, так и тем, что точная характеристика детектора неизвестна и принимается квадратичной.

### Порядок работы с прибором при измерении ДН антенн.

1. Включить усилитель и дать ему прогреться не менее 5 минут. Выходную мощность генератора максимально уменьшить аттенюаторами выхода.
2. Установить узкую полосу пропускания усилителя на частоте 1 кГц.
3. Ручки ОТНОШЕНИЕ поставить в положения максимальной чувствительности: 1 (10 кΩ), 9, 9, 10.
4. Ручку УСИЛЕНИЕ поставить в такое положение, чтобы при отсутствии сигнала показания прибора за счет собственного шума не превышали 10 делений шкалы. При измерениях показания ниже этого уровня следует принимать за нуль.
5. Установить на генераторе режим внутренней модуляции и, увеличивая выходную мощность, установить её такой, чтобы в направлении максимума ДН показания прибора находились во второй половине шкалы при положении ручки ОТНОШЕНИЕ  $\times 10^{-2}$ . Это означает, что показания прибора следует умножать на 100. При уменьшении сигнала при повороте антенны следует перейти на более чувствительные шкалы ручками ОТНОШЕНИЕ  $\times 10^{-1}$  и 1.
6. Для увеличения уровня сигнала перед измерениями следует подстроить частоту настройки усилителя и коротко-замыкающий поршень детекторной секции.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4 ПРОГРАММА РАСЧЁТА ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ

Обозначения:

**L** – размер раскрыва в см,  $\lambda$  – длина волны в см (вводятся);

**N** – число точек отсчёта по раскрыву (вводится); **i** – номер точки на раскрыве;

**x<sub>i</sub>** – координата точки на раскрыве, **x=0** – центр раскрыва;

**fdb** – вектор амплитуд поля в децибелах в точках  $x_i$  (вводится);

$f_{0,i}$  – вектор амплитуд поля в размах в точках  $x_i$ ,

**Φ1** – вектор фаз поля в градусах в точках  $x_i$  (вводится);

**Φ** – вектор фаз поля в радианах в точках  $x_i$ ;

**m** – номер расчетной точки по углу  $\theta$ ;

$\theta_m$  – угол диаграммы направленности, изменяется от  $-\pi/2$  до  $+\pi/2$ ,  $\theta_m = 0$  соответствует нормали к раскрыву антенны;

$u_{m,i}$  – поле от точки раскрыва  $x_i$  в направлении угла  $\theta_m$ ;

$F_m$  – комплексная ненормированная диаграмма направленности;

$G_m$  – амплитудная ненормированная диаграмма направленности;

$DN_m$  – нормированная диаграмма направленности;

Для выполнения расчётов необходимо изменить следующие данные:

$\lambda$ , **fdb**, **Φ1**. Для заполнения массивов **fdb** и **Φ1** их следует вводить как матрицы с одной строкой и числом столбцов, равном числу точек отсчета **N**. В программе **ORIGIN = 0**.

$$j := \sqrt{-1} \quad L := 20 \quad \lambda := 3 \quad k := 2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \quad N := 20 \quad i := 0..N \quad x_i := L \cdot \left( \frac{-1}{2} + \frac{i}{N} \right)$$

$$\mathbf{fdb} := (320 \ 16 \ 10 \ 7 \ 4.6 \ 3 \ 1.8 \ 1 \ 0.44 \ 0.1 \ 0 \ 0.1 \ 0.44 \ 1 \ 1.8 \ 3 \ 4.6 \ 7 \ 10 \ 16 \ 320)$$

$$\mathbf{\Phi 1} := (343 \ 278 \ 219 \ 168 \ 123 \ 86 \ 55 \ 31 \ 14 \ 3.4 \ 0 \ 3.4 \ 14 \ 31 \ 55 \ 86 \ 123 \ 168 \ 219 \ 278 \ 343)$$

$$m := 0..18 \quad \theta_m := \frac{-\pi}{2} + \frac{\pi \cdot m}{18} \quad f_{0,i} := 10^{\frac{-\mathbf{fdb}_{0,i}}{20}} \quad \Phi := \mathbf{\Phi 1} \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$u_{m,i} := f_{0,i} \cdot e^{j \cdot \Phi_{0,i}} \cdot e^{j \cdot k \cdot x_i \cdot \sin(\theta_m)}$$

$$F_m := \left( u_{m,0} + u_{m,N} + 2 \cdot \sum_{p=1}^{N-1} u_{m,p} \right) \cdot \frac{1 + \cos(\theta_m)}{2}$$

$$G_m := |F_m| \quad DN_m := \frac{|F_m|}{\max(G)}$$

