

А. И. ДОЛБИК

УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ
АНТЕННЫХ СИСТЕМ

2005

Издание предназначено для обучающихся, изучающих дисциплину "Устройства СВЧ и антенны". Многие из приведенных методик могут оказаться полезными при написании обучаемыми курсовых и выпускных квалификационных работ.

ВВЕДЕНИЕ

Теоретические знания, полученные обучающимися на лекциях, не сразу становятся инструментом активного познания явлений и процессов, происходящих в изучаемых объектах или системах. Необходимо определенное время, чтобы эта теория стала собственным убеждением обучающихся, нужен определенный опыт для формирования умений, приобретения навыков в ее применении на практике. Достигается это применением в учебных заведениях различных форм практического обучения. Основными из них являются практические занятия.

На практических занятиях по дисциплине "Устройства СВЧ и антенны" обучающиеся осваивают элементы антенн и устройства СВЧ, овладевают основными методами и приемами инженерного расчета параметров и характеристик антенн и устройств СВЧ путем решения специально подобранных задач, а также получают разъяснение теоретических положений курса.

При проведении практических занятий основное внимание уделяется:

развитию аналитических и вычислительных навыков;

привитию навыков составления и анализа моделей простых реальных задач;

выработке навыков отбора данных нужных для решения задач и оценке их необходимой точности;

рассмотрению задач, требующих предварительного вывода аналитических зависимостей;

решению несложных задач прикладного характера, связанных с будущей специальностью обучающихся;

доведению задач до практически приемлемого результата;

действиям с размерными величинами, методам контроля правильности решения;

прикидкам, оценке порядков величин, асимптотическим оценкам;

применению вычислительной техники, справочников и таблиц.

Кроме того, могут сообщаться дополнительные теоретические сведения.

В приложениях изложены как методики расчета различных антенн согласно плану занятия, так и методики расчета антенных систем наиболее значимых образцов РЭС, которые могут использоваться в ходе дипломного проектирования. Кроме того, приведены некоторые справочные данные, часто применяемые при расчете антенн.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЮЩИХ АНТЕНН

Время: 2 часа.

Учебные и воспитательные цели

1. Выработать навыки в решении задачи определения характеристик и параметров передающих антенн, выполнении математических расчетов.
2. Изучить влияние параметров антенн на ТТХ РЛС и возможность обнаружения воздушных целей.
3. Сконцентрировать внимание обучающихся на наиболее сложных, узловых вопросах в характеристиках и параметрах передающих антенн.
4. Стимулировать активную познавательную деятельность обучающихся в области теории передающих антенн.

Рассматриваемые вопросы

1. Назначение и классификация антенн.
2. Оценка влияния основных радиотехнических характеристик (РТХ) и параметров (РТП) передающих антенн на качественные показатели работы РТС.

Методические указания по подготовке и проведению занятия

Данное практическое занятие базируется на материале лекции "Характеристики и параметры передающих антенн".

При отработке первого вопроса закрепляется материал по классификации антенн, изучаются соответствующие образцы антенн, разбираются отличительные признаки каждого класса и их основные достоинства и недостатки (диапазонность, сложность конструкции, габаритные и весовые показатели, направленность), а также их использование в РЛС РТВ.

При рассмотрении второго вопроса решается комплексная задача.

Задача. РЛС имеет антенну с диаграммой направленности игольчатого типа. КПД антенны равен 0,95. При экспериментальном измерении ДНА были получены результаты, представленные в табл. 1.

Таблица 1

$\theta, \varphi, \text{град.}$	0	± 5	± 10	± 15	± 20	± 40	± 60	± 80	± 100	± 120	± 140	± 160	± 180
E, мВ/м	100	98	86	60	0	11	19	16	0	10	10	0	6

Известно, что РЛС имеет частоту повторения импульсов $F_{\text{п}}$, максимальную

дальность действия R_{\max} , а ее антенна вращается по азимуту φ со скоростью Ω_a .

Требуется:

1) определить потенциальную разрешающую способность РЛС по угловым координатам ($\Delta\theta_{\min}$, $\Delta\varphi_{\min}$);

2) найти количество импульсов в пачке отраженных от цели сигналов;

3) оценить, каким образом следует изменить параметры антенны, чтобы обеспечить максимальную дальность действия R'_{\max} и разрешающую способность по угловым координатам $\Delta\theta'_{\min}$, $\Delta\varphi'_{\min}$.

Варианты индивидуальных заданий практическому занятию приведены в табл. 2.

Решение.

При ответе на первый вопрос задачи необходимо уяснить, что потенциальная разрешающая способность РЛС по угловым координатам определяется шириной диаграммы направленности антенны.

Для ее определения необходимо построить график ДНА в прямоугольной системе координат (рис. 1).

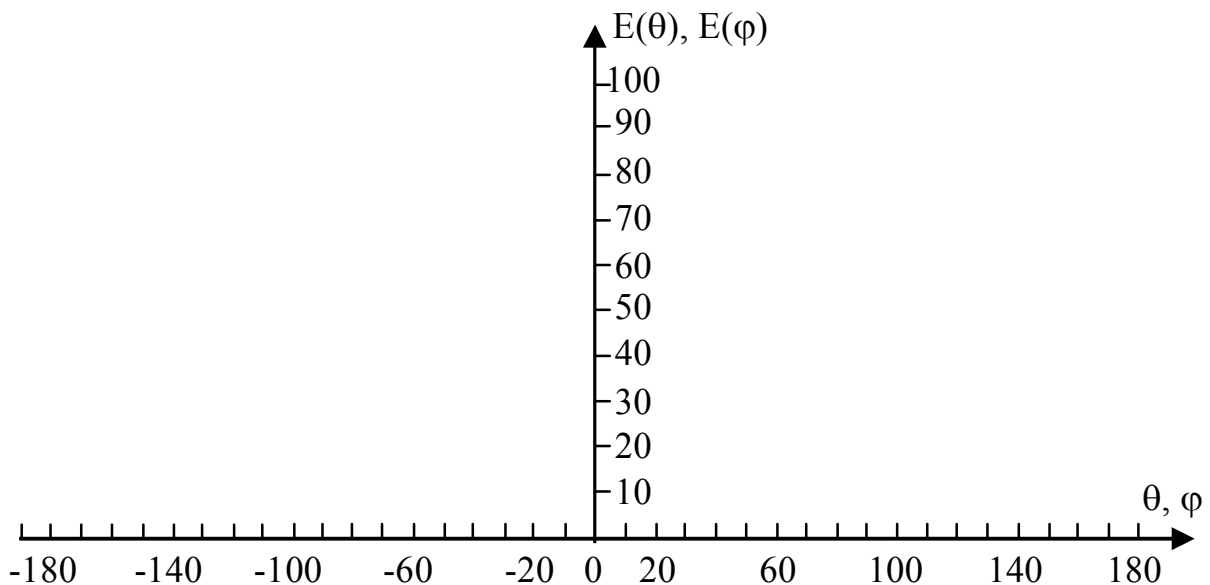


Рис. 1

Следует обратить внимание на то, что ДН снята по амплитуде и для определения ее ширины необходимо выбирать уровень 0,707. В итоге вычисляются значения $2\varphi_{0,5p} = 2\theta_{0,5p}$, которые и являются ответом на первый вопрос.

Таблица 2

№ по списку	F_{II} , Гц	R_{max} , км	Ω_a , об/мин	R'_{max} , км	$\Delta\theta'_{min}$, град
1	300	90	6	200	2
2	350	100		240	3
3	400	110		180	4
4	450	120		220	5
5	500	130		200	2
6	550	90		180	3
7	600	100		240	4
8	300	110		220	5
9	350	120		200	2
10	400	130	3	180	3
11	450	90		240	4
12	500	100		220	5
13	550	110		200	2
14	600	120		180	3
15	300	130		240	4
16	350	90		220	5
17	400	100		200	2
18	450	110		180	3
19	500	120		240	4
20	550	130	220	5	
21	600	90	6	200	2
22	300	100		180	3
23	350	110		240	4
24	400	120		220	5
25	450	130		200	2
26	500	90		180	3
27	550	100		240	4
28	600	110		220	5
29	300	120		200	2
30	350	130		240	3

При ответе на второй вопрос задачи необходимо сформулировать понятие пачки импульсов от цели при обзоре пространства. Поняв физическую природу пачки, можно логически прийти к зависимости:

$$N_i = F_n T_{обл} = F_n \frac{2\varphi_{0,5p}^0}{\Omega_a [\text{град}/c]}. \quad (1)$$

Следует обратить внимание на то, что количество импульсов в пачке прямо пропорционально ширине ДН по азимуту.

Для ответа на третий вопрос задачи надо рассмотреть формулу дальности действия РЛС с совмещенной приемопередающей антенной в свободном пространстве:

$$R_{\max} = 4 \sqrt{\frac{P_{cp} G_{\max}^2 \sigma_{ц} \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{np} \min q}}. \quad (2)$$

Следует обратить внимание на роль коэффициента усиления (КУ) антенны в формуле. По условию задачи нахождения G_{\max} не требуется, однако целесообразно определить его значение по формуле:

$$G_{\max} = D_{\max} \eta_A = \frac{4\pi \cdot 0,75}{2\theta_{0,5p}^0 2\varphi_{0,5p}^0} \eta_A. \quad (3)$$

Чтобы избежать весьма распространенной грубой ошибки при проведении расчетов, надо учитывать, что в выражении (3) телесный угол в числителе выражен в радианах, а в знаменателе – в градусах.

Далее, изменяя коэффициент усиления, необходимо добиться увеличения максимальной дальности и разрешающей способности. При этом выбирается КУ, который удовлетворяет обоим необходимым значениям (сначала производится расчет для дальности, потом для разрешающей способности и выбирается нужное значение).

Вопросы для подготовки к занятию

1. Классификация антенных систем.
2. Амплитудная диаграмма направленности антенны.
3. Фазовая диаграмма антенны.
4. Поляризационная диаграмма антенны.
5. Частотная характеристика антенны.
6. Основные РТП передающих антенн (ширина ДН, коэффициент направленного действия (КНД), КУ, КПД).

Рекомендуемая литература

1. Шифрин Я.С. Антенны: Учеб. пособие. Харьков: ВИРТА ПВО, 1976. С. 3–36.
2. Марков Л.Н. и др. Антенные системы радиоэлектронной техники. М: Воениздат, 1993. С. 3–47.
3. Долбик А. И. Устройства СВЧ и антенны: Учеб. пособие. СПб: ФВУ ПВО, 2002. Ч.1: Основы теории антенн и элементы антенных систем. С. 3–15.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

РАСЧЕТ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНЫХ АНТЕНН

Время: 2 часа.

Учебные и воспитательные цели

1. Выработать навыки в определении основных характеристик и параметров приемных антенн, выполнении математических расчетов.
2. Освоить методику измерения основных характеристик приемных антенн.
3. Стимулировать активную познавательную деятельность обучающихся в области теории передающих антенн.

Рассматриваемые вопросы

1. Основы теории приемных антенн.
2. Методика измерения основных радиотехнических характеристик и параметров приемных антенн.

Методические указания по подготовке и проведению занятия

Данное практическое занятие базируется на материале лекции "Характеристики и параметры приемных антенн".

Основным из двух учебных вопросов занятия следует считать первый. При его отработке можно выделить два этапа:

обсуждение основных понятий, изложенных на лекции, и контроль их усвоения;

решение задач, связывающих теоретические выводы с практикой расчета основных параметров как приемных антенн, так и РЛС в целом.

На втором этапе решаются задачи. Варианты индивидуальных заданий к

практическому занятию приведены в табл. 3.

Задача 1. Приемная антенна представляет собой полуволновый симметричный вибратор (рис. 2). Его максимальный коэффициент направленного действия равен 1,64. Определить эффективную площадь этой антенны, если длина волны λ .

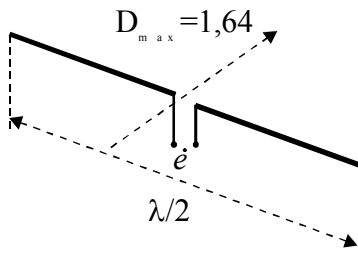


Рис. 2

Решение

$$S_{\text{эфф}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_{\text{max}}. \quad (4)$$

Следует обратить внимание на то, что полуволновый вибратор не имеет осязаемой геометрической площади, поскольку проводник, из которого он выполнен, может быть очень тонким. Однако его эффективная площадь достаточно велика, что говорит об условности, а не о физической реальности $S_{\text{эфф}}$.

Задача 2. Размеры раскрыва приемной антенны – $A \times B$ (рис. 3). Коэффициент использования площади равен ξ_A , а коэффициент полезного действия – η_A . Напряженность падающего на антенну поля составляет E . Требуется определить мощность на согласованном с антенной входе приемника.

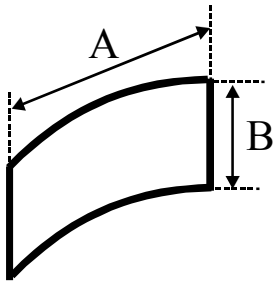


Рис. 3

Решение

$$P_{\text{пр bx}} = P_{H \text{ max}} = \Pi S_{\text{эфф}} \eta_A, \quad (5)$$

$$\text{где } \Pi = \frac{E^2}{240\pi}; \quad S_{\text{эфф}} = S_{\Gamma} \xi_A; \quad S_{\Gamma} = A \times B.$$

Задача 3. В результате неправильной эксплуатации зеркало приемопередающей антенны РЛС было деформировано, и коэффициент использования площади снизился с 0,9 до 0,5. Требуется узнать, как изменится дальность действия РЛС.

Решение

Уравнение максимальной дальности действия РЛС:

Таблица 3

№ по списку	λ , м	$A \times B$, м	η_A	ξ_A	E , мкВ/м
1	3	3×1,5	0,9	0,6	0,5
2	2,5	4×2		0,5	0,6
3	2	4,5×1,5		0,4	0,7
4	1,5	3×2		0,6	0,8
5	1	5×2		0,5	0,9
6	0,5	4×1		0,4	1
7	3	3×1,5		0,6	0,5
8	2,5	4×2		0,5	0,6
9	2	4,5×1,5		0,4	0,7
10	1,5	3×2	0,95	0,6	0,8
11	1	5×2		0,5	0,9
12	0,5	4×1		0,4	1
13	3	3×1,5		0,6	0,5
14	2,5	4×2		0,5	0,6
15	2	4,5×1,5		0,4	0,7
16	1,5	3×2		0,6	0,8
17	1	5×2		0,5	0,9
18	0,5	4×1		0,4	1
19	3	3×1,5		0,6	0,5
20	2,5	4×2	0,5	0,6	
21	2	4,5×1,5	0,9	0,4	0,7
22	1,5	3×2		0,6	0,8
23	1	5×2		0,5	0,9
24	0,5	4×1		0,4	1
25	3	3×1,5		0,6	0,5
26	2,5	4×2		0,5	0,6
27	2	4,5×1,5		0,4	0,7
28	1,5	3×2		0,6	0,8
29	1	5×2		0,5	0,9
30	0,5	4×1		0,4	1

$$R_{\max} = 4 \sqrt{\frac{P_{cp} G_{\max}^2 \sigma_{\psi} \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{np \min} q}}, \quad (6)$$

где $G_{\max} = D_{\max} \eta_A = \frac{4\pi \cdot S_{\Gamma} \xi_A}{\lambda^2} \eta_A$ – коэффициент усиления приемопередающей антенны.

Обозначим исходный КИП символом ξ_{A1} , а КУ – $G_{\max 1}$, соответственно КИП поврежденной антенны – ξ_{A2} , а КУ – $G_{\max 2}$.

Из приведенных выражений видно, что

$$\frac{R_{\max 2}}{R_{\max 1}} = 4 \sqrt{\frac{G_{\max 2}^2}{G_{\max 1}^2}} = \sqrt{\frac{G_{\max 2}}{G_{\max 1}}} = \sqrt{\frac{\eta_{A2}}{\eta_{A1}}}.$$

Второй вопрос посвящен рассмотрению основных методов, используемых для измерения радиотехнических характеристик и параметров приемных антенн. Основные теоретические сведения по этому вопросу приведены в приложении 1.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Принцип взаимности.
2. РТХ приемных антенн.
3. Основные РТП приемных антенн (ширина ДН, КНД, КУ, КПД, эффективная площадь антенны, мощность, отдаваемая антенной в нагрузку).

Рекомендуемая литература

1. Шифрин Я.С. Антенны: Учеб. пособие. Харьков: ВИРТА ПВО, 1976. С. 37–52.
2. Марков Л.Н. и др. Антенные системы радиоэлектронной техники. М: Воениздат, 1993. С. 48–62.
3. Долбик А. И. Устройства СВЧ и антенны: Учеб. пособие. СПб: ФВУ ПВО, 2002. Ч.1: Основы теории антенн и элементы антенных систем. С. 15–22.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3
ВЛИЯНИЕ ВОЛНОВЫХ РАЗМЕРОВ И АФР
НА МНОЖИТЕЛЬ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ.

Время: 2 часа.

Учебные и воспитательные цели

1. В ходе решения практических задач углубить знания обучающихся в вопросах зависимости множителя линейной антенной системы от ее параметров и амплитудно-фазового распределения.
2. Освоить методику построения графического изображения множителя системы в прямоугольных и полярных координатах.
3. Формировать у обучающихся самостоятельность в работе, уверенность в своих силах.

Рассматриваемые вопросы

1. Влияние волновых размеров на множитель системы.
2. Влияние амплитудного распределения на множитель системы.
3. Влияние фазового распределения на множитель системы.

Методические указания по подготовке и проведению занятия

Данное практическое занятие базируется на материале лекций "Линейные системы дискретно распределенных излучателей", "Влияние фазового распределения на множитель системы" и самостоятельной работы "Линейные системы непрерывно распределенных излучателей".

Занятие посвящено решению задач по расчету множителя линейной системы излучателей при различных параметрах антенны. Индивидуальные задания на практическое занятие даны в табл. 4.

Методика решения указанных задач приведена в приложении 2.

Задача 1. Рассчитать и построить нормированный множитель непрерывной синфазной линейной системы длиной L при длине волны λ и равномерном амплитудном распределении. Определить уровень первого и второго боковых лепестков и ширину основного лепестка по нулям.

Дано: $L, \lambda, A(x)=1, \varphi(x)=0$.

Требуется: построить $F_{сист}(\psi), F_{сист}(\theta)$, найти $F_{\delta 1}, F_{\delta 2}, 2\theta_0$.

Задача 2. Определить, как изменится диаграмма направленности линейной антенной системы в условиях задачи 1, если ее длину уменьшить в n раз.

Таблица 4

№ по списку	λ , см	L , см	φ_1	n	d , см
1	10	40	π	2	$d=\lambda$
2	12	60			
3	15	80			
4	20	120			
5	10	60			
6	12	120			
7	15	90			
8	20	80			
9	10	40			
10	12	60			
11	15	80			
12	20	120			
13	10	60			
14	12	120			
15	15	90			
16	20	80			
17	10	40			
18	12	60			
19	15	80			
20	20	120	π		
21	10	60			
22	12	120			
23	15	90			
24	20	80			
25	10	40			
26	12	60			
27	15	80			
28	20	120			
29	10	60			
30	12	120			

Дано: $L/n, \lambda, A(x)=1, \varphi(x)=0$.

Требуется: построить $F_{сист}(\psi), F_{сист}(\theta)$, найти $F_{\delta 1}, F_{\delta 2}, 2\theta_0$.

Задача 3. Что произойдет с множителем системы в условиях задачи 2, если равномерное амплитудное распределение заменить косинусным.

Дано: $L/n, \lambda, A(x)=\cos(\pi/2)x, \varphi(x)=0$.

Требуется: построить $F_{сист}(\psi), F_{сист}(\theta)$, найти $F_{\delta 1}, F_{\delta 2}, 2\theta_0$.

Задача 4. Определить, что произойдет с множителем системы в условиях задачи 2, если синфазное распределение заменить прямофазным $\varphi(x) = ax$.

Дано: $L/n, \lambda, A(x)=1, \varphi(x) = ax$.

Требуется: построить $F_{сист}(\psi), F_{сист}(\theta)$, найти $F_{\delta 1}, F_{\delta 2}, 2\theta_0$.

Задача 5. Как будет выглядеть множитель линейной системы в условиях задачи 1, если вместо непрерывной ее сделать дискретной, а расстояние между элементарными излучателями выбрать равной длине волны?

Дано: $L, \lambda, d, A(x)=1, \alpha=0$.

Требуется: построить $F_{сист}(\psi), F_{сист}(\theta)$, найти $F_{\delta 1}, F_{\delta 2}, 2\theta_0$.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Множитель линейной непрерывной системы излучателей.
2. Множитель линейной дискретной системы излучателей.
3. Виды амплитудных распределений.
4. Виды фазовых распределений.
5. Влияние амплитудного распределения на диаграмму направленности.
6. Влияние амплитудного распределения на диаграмму направленности.

Рекомендуемая литература

1. Шифрин Я.С. Антенны: Учеб. пособие. Харьков: ВИРТА ПВО, 1976. С. 73–107.
2. Марков Л.Н. и др. Антенные системы радиоэлектронной техники. М: Воениздат, 1993. С. 80–132.
3. Долбик А. И. Устройства СВЧ и антенны: Учеб. пособие. СПб: ФВУ ПВО, 2002. Ч.1: Основы теории антенн и элементы антенных систем. С. 23–64.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4
МНГОВИВРАТОРНЫЕ АНТЕННЫ.
РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ИХ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ.

Время: 2 часа.

Учебные и воспитательные цели

1. Ознакомить обучающихся с порядком расчета собственных и взаимных сопротивлений вибраторов в многовибраторной антенне.
2. Дать обучаемым понятие о согласующих и симметрирующих устройствах, о способах расширения полосы пропускания вибраторных антенн.
3. Ознакомить обучающихся с методикой электрического и конструктивного расчета директорной антенны.
4. Привить практические навыки применения методики для расчета директорной антенны.
5. Формировать у обучающихся самостоятельность в работе, уверенность в своих силах.

Рассматриваемые вопросы

1. Входное сопротивление в многовибраторной антенне.
2. Согласующие и симметрирующие устройства.
3. Способы расширения полосы пропускания.
4. Расчет элементов конструкции директорной антенны.
5. Расчет характеристик и параметров директорной антенны.

Методические указания по подготовке и проведению занятия

Данное практическое занятие базируется на материале лекции "Вибраторные антенны".

Занятие разбивается на два этапа. В ходе первого этапа рассматриваются три первых вопроса. При этом обучаемым излагается новый материал. В ходе второго этапа решаются три задачи на конструктивный расчет директорной антенны. Индивидуальные задания приведены в табл. 5.

Задача 1. Определить размеры симметричного полуволнового вибратора для работы на частоте f_0 с полосой пропускания ΔF .

Решение: Длина волны $\lambda = c/f_0$. Волновое сопротивление вибратора

Таблица 5

№ по списку	f_0 , МГц	ΔF , МГц	$X_{\text{РЕФ}}$, Ом	$X_{\text{АКТ}}$, Ом	$2\theta_{0,5P}$, град
1	200	50	20	0	47
2	150	30			35
3	100	40			32
4	200	40			28
5	150	30			26
6	100	50			47
7	200	50			35
8	150	30			32
9	100	40			28
10	200	40			26
11	150	30	47		
12	100	50	35		
13	200	50	32		
14	150	30	28		
15	100	40	26		
16	200	40	47		
17	150	30	35		
18	100	50	32		
19	200	50	28		
20	150	30	26		
21	100	40	47		
22	200	40	35		
23	150	30	32		
24	100	50	28		
25	200	50	26		
26	150	30	47		
27	100	40	35		
28	200	40	32		
29	150	30	28		
30	100	50	26		

$$\rho_A = \frac{4R_{ex}}{\pi \cdot 2\Delta F} f_0. \quad (7)$$

Из формулы для волнового сопротивления

$$\rho_A = 120 \left(\ln \frac{\lambda}{\pi \cdot a} - 0,577 \right) \quad (8)$$

определяется диаметр проводника вибратора. При этом $\lambda/\pi a = e^{\frac{\rho_A}{120} + 0,577}$. Теперь несложно вычислить диаметр $2a$.

Укорочение вибратора рассчитывается по формуле:

$$\Delta = \frac{42,5}{\rho_A} \cdot \frac{\lambda}{2\pi}. \quad (9)$$

Окончательно длина плеча вибратора определяется как $l = \frac{\lambda}{4} - \Delta$.

Задача 2. Рассчитать директорную антенну с шириной диаграммы направленности $2\theta_{0,5p}$ для работы на частоте f_0 с полосой пропускания ΔF .

Решение приведено в приложении 3 в виде методики общего расчета директорной антенны.

Задача 3. Определить значения D_{max} , $2\theta_{0,5p}$, Z_{ex} по заданным значениям длины волны λ , количеству вибраторов N и расстоянию между ними d .

Решение приведено в приложении 4 в виде методики определения основных радиотехнических характеристик и параметров директорной антенны.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Основные РТХ и РТП симметричного вибратора.
2. Система из двух симметричных вибраторов.
3. Директорная антенна.

Рекомендуемая литература

1. Шифрин Я.С. Антенны: Учеб. пособие. Харьков: ВИРТА ПВО, 1976. С. 115–148.
2. Марков Л.Н. и др. Антенные системы радиоэлектронной техники. М: Воениздат, 1993. С. 157–183.
3. Долбик А. И. Устройства СВЧ и антенны: Учеб. пособие. СПб: ФВУ ПВО, 2002. Ч.1: Основы теории антенн и элементы антенных систем. С. 66–81.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5
ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННА. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЕЕ
ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ.

Время: 2 часа.

Учебные и воспитательные цели

1. Закрепить знания обучающихся о конструкциях волноводно-щелевых антенн, их характеристиках и параметрах, полученные на лекции.
2. Ознакомить обучаемых с методикой электрического и конструктивного расчета волноводно-щелевой антенны (ВЩА).
3. Сформировать практические навыки в применении методики расчета ВЩА.
4. Выработать у обучающихся самостоятельность в работе, уверенность в своих силах.

Рассматриваемые вопросы

1. Конструкции, характеристики и параметры волноводно-щелевых антенн.
2. Расчет характеристик и параметров волноводно-щелевой антенны

Методические указания по подготовке и проведению занятия.

Данное практическое занятие базируется на материале лекции "Щелевые антенны".

В рамках первого вопроса закрепляется материал по классификации и конструктивным параметрам щелевых антенн, их радиотехническим характеристикам и параметрам, способам питания.

При рассмотрении второго вопроса решаются задачи по расчету конструкции ВЩА, а также определению ее основных РТХ и РТП.

Индивидуальные задания на практическое занятие представлены в табл. 6.

Задача 1. Рассчитать приемную волноводно-щелевую антенну с линейной поляризацией на длине волны λ и коэффициентом направленного действия D_{\max} .

Решение задачи приведено в приложении 5 в виде методики общего расчета резонансной волноводно-щелевой антенны.

Задача 2. Проверить возможность использования рассчитанной антенны в качестве передающей с мощностью излучения P_{Σ} при коэффициенте запаса k_3 .

Таблица 6

№ по списку	f_0 , МГц	D_{\max}	k_3	Способ питания	P_{Σ} , кВт
1	200	12,8	2	2π	80
2	150	19,2			90
3	100	25,6			160
4	200	32			100
5	150	38,4			120
6	100	12,8			40
7	200	19,2			60
8	150	25,6			80
9	100	32			90
10	200	38,4			120
11	150	12,8	3		80
12	100	19,2			90
13	200	25,6			160
14	150	32			100
15	100	38,4			120
16	200	12,8			40
17	150	19,2			60
18	100	25,6			80
19	200	32			90
20	150	38,4			120
21	100	12,8	4	π	80
22	200	19,2			90
23	150	25,6			160
24	100	32			100
25	200	38,4			120
26	150	12,8			40
27	100	19,2			60
28	200	25,6			80
29	150	32			90
30	100	38,4			120

Решение: Проверка сводится к определению ширины щели, при которой происходит электрический пробой, и сравнению ее с полученной в задаче 1.

Ширина щели должна быть больше (либо равна) минимальной ширины при заданных параметрах антенны:

$$d_{\min} = k_3 \frac{U_{щ\max}}{E_{пр}}, \quad (10)$$

где $U_{щ\max} = \sqrt{\frac{P_{\Sigma n}}{G_{\Sigma n}}}$ - максимальное напряжение на щели в пучности, $P_{\Sigma n} = \frac{P_{\Sigma}}{N}$ -

мощность, излучаемая одной щелью, $G_{\Sigma n}$ - проводимость щели.

Если $d_{щ} \geq d_{\min}$, то рассчитанная антенна может быть использована в качестве передающей.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Конструкции и характеристики щелевой антенны.
2. Принцип двойственности Пистелькорса.
3. Основные РТХ и РТП одиночной щели.
4. Конструкции, характеристики и способы питания резонансной волноводно-щелевой антенны.
5. Конструкции, характеристики и способы питания нерезонансной волноводно-щелевой антенны.

Рекомендуемая литература

1. Шифрин Я.С. Антенны: Учеб. пособие. Харьков: ВИРТА ПВО, 1976. С. 149–162.
2. Марков Л.Н. и др. Антенные системы радиоэлектронной техники. М: Воениздат, 1993. С. 193–209.
3. Долбик А. И. Устройства СВЧ и антенны: Учеб. пособие. СПб: ФВУ ПВО, 2002. Ч.1: Основы теории антенн и элементы антенных систем. С. 81–90.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6
РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РУПОРНЫХ
И ЛИНЗОВЫХ АНТЕНН.

Время: 2 часа.

Учебные и воспитательные цели

1. Закрепить знания обучающихся о конструкциях волноводных и рупорных антенн, их характеристиках и параметрах, полученные на лекции.
2. Проверить знания обучаемых о конструкциях линзовых антенн, их характеристиках и параметрах, полученные на самостоятельной работе.
3. Привить курсантам практические навыки в расчете рупорных и линзовых антенн.
4. Сформировать практические навыки в расчете характеристик и параметров рупорных и линзовых антенн.
5. Воспитать у обучающихся самостоятельность в работе, уверенность в своих силах.

Рассматриваемые вопросы

1. Расчет и анализ АФР, характеристик направленности и параметров рупорных антенн.
2. Принцип действия замедляющих и ускоряющих линз. Геодезические линзы.

Методические указания по подготовке и проведению занятия

Данное практическое занятие базируется на материале лекции "Рупорные антенны" и самостоятельной работы "Линзовые антенны".

При отработке первого вопроса закрепляется материал по классификации и конструктивным параметрам волноводных и рупорных антенн, их радиотехническим характеристикам и параметрам. При этом необходимо решить четыре задачи.

Индивидуальные задания на практическое занятие даны в табл. 7.

Задача 1. Определить ширину диаграммы направленности и максимальный КНД открытого конца волновода сечением $a \times b$.

Решение: Стандартный волновод имеет размеры: $a=0,72\lambda$, $b=0,34\lambda$. Отсюда $\lambda=a/0,72$.

Ширина ДН в Е-плоскости

Таблица 7

№ по списку	$a \times b$, мм	$A \times B$, см	R_1 , см	f , м	n
1	72×34	10×10	6	1,5	2
2	72×34	10×3,4	8		
3	72×34	7,2×10	10		
4	34×15	8×8	5		
5	34×15	8×1,5	6		
6	34×15	3,4×8	8	2	
7	23×10	12×12	4		
8	23×10	2,3×12	6		
9	23×10	12×1,0	8		
10	72×34	12×12	6		
11	72×34	7,2×12	8	2,5	1,7
12	72×34	12×3,4	10		
13	34×15	18×18	5		
14	34×15	18×1,5	6		
15	34×15	3,4×18	8		
16	23×10	10×10	4	3	
17	23×10	10×1,0	6		
18	23×10	2,3×10	8		
19	72×34	10×10	6		
20	72×34	10×3,4	8		
21	72×34	7,2×10	10	1,5	1,5
22	34×15	8×8	5		
23	34×15	8×1,5	6		
24	34×15	3,4×8	8		
25	23×10	12×12	4		
26	23×10	2,3×12	6	2	
27	23×10	12×1,0	8		
28	72×34	12×12	6		
29	72×34	7,2×12	8		
30	72×34	12×3,4	10		

$$2\theta_{0,5P}=51^0 \frac{\lambda}{b} = 51^0 \frac{\lambda}{0,34\lambda} = 150^0, \quad (11)$$

в Н-плоскости –

$$2\theta_{0,5P}=68^0 \frac{\lambda}{a} = 68^0 \frac{\lambda}{0,72\lambda} = 94^0. \quad (12)$$

Максимальный КНД определяется как

$$D_{\max}=0,81 \frac{4\pi}{\lambda^2} (a \times b) = 0,81 \frac{4\pi}{\lambda^2} \times 0,72 \times 0,32 = 2,49. \quad (13)$$

Задача 2. Определить ширину ДН и максимальный КНД рупора с размерами раскрыва $A \times B$, питаемого стандартным волноводом сечением $a \times b$.

Решение: Стандартный волновод имеет размеры: $a=0,72\lambda$, $b=0,34\lambda$. Отсюда $\lambda=0,34b$.

Формулы для определения основных РТП различных рупоров приведены в табл. 8.

Таблица 8

Тип антенны	D_{\max}	КИП	$2\theta_{0,5P\alpha}$	$2\theta_{0,5P\beta}$	R_{opt}
Открытый конец волновода	$0,81 \frac{4\pi}{\lambda^2} ab$	0,81	$51 \frac{\lambda}{b}$	$68 \frac{\lambda}{a}$	-
Н-секториальный рупор	$0,64 \frac{4\pi}{\lambda^2} Ab$	0,64	$51 \frac{\lambda}{b}$	$78 \frac{\lambda}{A}$	$\frac{A^2}{3,3\lambda}$
Е-секториальный рупор	$0,64 \frac{4\pi}{\lambda^2} aB$	0,64	$56 \frac{\lambda}{B}$	$68 \frac{\lambda}{a}$	$\frac{B^2}{2,1\lambda}$
Пирамидальный рупор	$0,5 \frac{4\pi}{\lambda^2} AB$	0,5	$56 \frac{\lambda}{B}$	$78 \frac{\lambda}{A}$	$\frac{A^2}{3\lambda}$
Конический рупор	$0,51 \frac{4\pi}{\lambda^2} S_{\Gamma}$	0,51	$60 \frac{\lambda}{d}$	$70 \frac{\lambda}{d}$	$0,3 \frac{(2d)^2}{\lambda}$

Задача 3. Вычислить величину фазовых искажений в соответствующих плоскостях на краях раскрыва рупора с размерами $A \times B$, питаемого стандартным волноводом сечением $a \times b$, для длин волн λ , $\lambda_1 = \lambda/2$ и длин рупора R_1 , $R_2 = R_1/10$.

Решение: Величина фазовых искажений в рупоре определяется по формуле:

$$\varphi_{\max} = \pi L^2 / 4\lambda R, \quad (14)$$

где L – размер рупора в соответствующей плоскости.

Задача 4. Вычислить оптимальную длину рупора для условий предыдущей задачи и длин волн λ , $\lambda_1 = \lambda/2$.

Решение: Формулы для определения оптимальной длины рупора любого типа приведены в табл. 8.

При отработке второго вопроса путем устного опроса и диалога с курсантами обсуждаются принцип действия и конструкции замедляющих, ускоряющих линз, геодезических, неоднородных линз. Далее решается задача на конструктивный расчет и определение основных РТП линзовой антенны.

Задача 5. Однородная замедляющая линза (рис. 4), выполненная из диэлектрика с коэффициентом преломления n , имеет фокусное расстояние f . Угол ее раскрыва составляет $2\vartheta_0 = 60^\circ$.

Определить диаметр $2R_0$ и толщину z_0 линзы, а также ширину ДН $2\theta_{0,5}$ и максимальный КНД такой линзовой антенны, если длина волны λ , а КИП $\xi_a = 0,5$.

Решение:

$$\rho_{\max} = f \frac{n-1}{n \cos \vartheta_0 - 1};$$

$$R_0 = \rho_{\max} \sin \vartheta_0;$$

$$z_0 = \rho_{\max} \cos \vartheta_0 - f.$$

Для замедляющих линз АФР спадает на краях, и его обычно аппроксимируют функцией \cos . При этом коэффициент $C_{0,5} = (60-80)^\circ$. Основные РТП определяются по формулам:

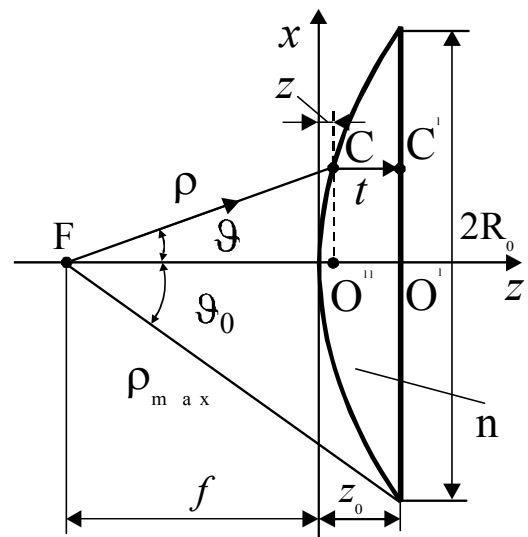


Рис. 4

$$2\theta_{0,5} = C_{0,5} \frac{\lambda}{R_0}; \quad D_{\max} = \frac{4\pi S_{\Gamma}}{\lambda^2} \xi_A; \quad S_{\Gamma} = \pi R_0^2. \quad (15)$$

Вопросы для подготовки к занятию:

1. Классификация и основные РТП апертурных антенн.
2. Классификация и основные РТП рупорных антенн.
3. Классификация линзовых антенн.
4. Конструкции и принцип действия замедляющих линз
5. Уравнение профиля замедляющей линзы.

6. Конструкции и принцип действия ускоряющих линз.
7. Зонирование линз.
8. Конструкции, принцип действия и применение неоднородных линз.
9. Конструкции, принцип действия и применение геодезических линз.

Рекомендуемая литература

1. Шифрин Я.С. Антенны: Учеб. пособие. Харьков: ВИРТА ПВО, 1976. С. 218–238, 283–304.
2. Марков Л.Н. и др. Антенные системы радиоэлектронной техники. М: Воениздат, 1993. С. 179–201.
3. Долбик А. И. Устройства СВЧ и антенны: Учеб. пособие. СПб: ФВУ ПВО, 2004. Ч.2: Антенные системы РЭС РТВ. С. 3–18.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7 РАСЧЕТ И ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

Время: 2 часа.

Учебные и воспитательные цели

1. Выработать навыки в решении задач определения основных радиотехнических характеристик зеркальных антенн, производстве математических расчетов.
2. Изучить возможности зеркальных антенн по формированию различных видов диаграмм направленности.
3. Сформировать у обучающихся самостоятельность в работе, уверенность в своих силах.

Рассматриваемые вопросы

1. Особенности конструкции и классификация зеркальных антенн РТС.
2. Способы создания различных типов диаграмм направленности.
3. Оценка основных РТХ зеркальных антенн РТС.

Методические указания по подготовке и проведению занятия

Данное практическое занятие базируется на материале лекций "Зеркальные антенны" и "Способы создания различных диаграмм направленности с помощью зеркальных антенн".

При отработке первого вопроса закрепляется материал по классификации и конструктивным параметрам зеркальных антенн, их радиотехническим характе-

ристикам и параметрам.

В рамках второго вопроса путем устного опроса и диалога с курсантами обсуждаются принципы создания различных диаграмм направленности, рассматриваются конструкции зеркальных антенн, применяемых в РЛС РТВ.

В ходе обработки третьего вопроса следует решить три задачи на расчет основных конструктивных и радиотехнических параметров зеркальных антенн.

Индивидуальные задания на практическое занятие приведены в табл. 9.

Задача 1. Антенна радиолокационного дальномера представляет собой усеченный параболоид приблизительно прямоугольной формы с размерами зеркала $A \times B$. Длина излучаемой волны λ . Вычислить КНД антенны, если коэффициент использования площади усеченного параболоида равен ξ_A .

Решение.

$$D_{\max} = \frac{4\pi}{\lambda} S_{\Gamma} \xi_A; \quad S_{\Gamma} = A \cdot B. \quad (16)$$

Задача 2. Для условия предыдущей задачи определить ширину ДН антенны в главных плоскостях.

Решение:

$$2\theta_{0,5p\varepsilon} = (65 \dots 70) \frac{\lambda}{A}; \quad 2\theta_{0,5p\beta} = (65 \dots 70) \frac{\lambda}{B}. \quad (17)$$

Задача 3. Радиолокационный дальномер должен обеспечить беспровальную проводку целей в секторе углов места $0^\circ - \varepsilon$. Ширина ДН по уровню половинной мощности составляет 5° . Требуется определить, сколько парциальных диаграмм и зеркал необходимо для создания зоны обнаружения дальномера, если фокусное расстояние параболоида f , а размер антенны в вертикальной плоскости – B .

Решение.

1. Количество парциальных диаграмм n в секторе $0^\circ - \varepsilon$ ($\Delta\varepsilon = \varepsilon$) составляет:

$$n = \Delta\varepsilon / 2\theta_{0,5p}. \quad (18)$$

2. Величина смещения облучателя из фокуса для формирования n -го лепестка веера определяется из выражения:

$$\theta_{mn} = K_p \arctg \frac{x_n}{f}, \quad (19)$$

где $K_p = 0,7 \dots 0,95$ – коэффициент редукции.

Тогда величина смещения из фокуса n -го облучателя

Таблица 9

№ по списку	λ , см	A×B, м	ξ_A	ε , град	f , м
1	10	6×4	0,4	45	2
2	12	7×3		30	3
3	14	8×5		15	4
4	15	9×4		45	5
5	16	6×2		30	2
6	10	9×5		15	3
7	12	6×4		45	4
8	14	7×3		30	5
9	15	8×5		15	2
10	16	9×4		0,45	45
11	10	6×2	30		4
12	12	9×5	15		5
13	14	6×4	45		2
14	15	7×3	30		3
15	16	8×5	15		4
16	10	9×4	45		5
17	12	6×2	30		2
18	14	9×5	15		3
19	15	6×4	45		4
20	16	7×3	30	5	
21	10	8×5	0,5	15	2
22	12	9×4		45	3
23	14	6×2		30	4
24	15	9×5		15	5
25	16	6×4		45	2
26	10	7×3		30	3
27	12	8×5		15	4
28	14	9×4		45	5
29	15	6×2		30	2
30	16	9×5		15	3

$$x_n = n \cdot \Delta x = n \cdot f \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta_{mn}}{K_p}. \quad (20)$$

3. Максимально необходимая величина смещения определяется как

$$x_{\max} = \Delta x(n - 1). \quad (21)$$

4. Максимально возможная величина смещения облучателя определяется из следующего соотношения:

$$\Delta X_{\max \text{ доп}} < 0,8 \frac{B}{2}. \quad (22)$$

5. Производится сравнение x_{\max} и $\Delta X_{\max \text{ доп}}$:

если $x_{\max} < \Delta X_{\max \text{ доп}}$, достаточно одного зеркала;

если $x_{\max} > \Delta X_{\max \text{ доп}}$, необходимо использовать дополнительное зеркало (или несколько зеркал).

Методики расчета различных зеркальных антенн для РЛС РТВ, которые могут оказаться полезными при курсовом и дипломном проектировании, приведены в приложении 9.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Классификация и основные РТП зеркальных антенн.
2. Принцип действия параболоида вращения полного профиля.
3. Конструктивные параметры параболоида вращения полного профиля.
4. Основные РТХ и РТП параболоида вращения полного профиля.
5. Способы создания веерной диаграммы направленности.
6. Конструкция и принцип действия параболоцилиндрической антенны.
7. Необходимость и способы создания косекансной ДН.

Рекомендуемая литература

1. Шифрин Я.С. Антенны: Учеб. пособие. Харьков: ВИРТА ПВО, 1976. С. 239–282.
2. Марков Л.Н. и др. Антенные системы радиоэлектронной техники. М: Воениздат, 1993. С. 202–225.
3. Долбик А. И. Устройства СВЧ и антенны: Учеб. пособие. СПб: ФВУ ПВО, 2004. Ч.2: Антенные системы РЭС РТВ. С. 18–39.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 8
РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Время: 2 часа.

Учебные и воспитательные цели

1. Закрепить и проверить знания обучающихся о классификации, принципах построения ФАР, их характеристиках и параметрах, полученные на лекции.
2. Привить обучаемым практические навыки в расчете конструктивных и радиотехнических параметров фазированных решеток.
3. Сформировать у обучающихся самостоятельность в работе, уверенность в своих силах.

Рассматриваемые вопросы

1. Основные радиотехнические характеристики линейных решеток.
2. Расчет характеристик антенной решетки.

Методические указания по подготовке и проведению занятия

Данное практическое занятие базируется на материале лекций "Электромеханические сканирующие устройства", "Фазированные антенные решетки" и "Принципы построения излучающих систем ФАР".

При отработке первого вопроса закрепляется материал по классификации сканирующих устройств, конструкциям фазированных решеток (ФАР), их радиотехническим параметрам, принципам построения их излучающих систем.

В рамках второго вопроса решается задача на расчет основных конструктивных и радиотехнических параметров фазированной антенной решетки.

Индивидуальные задания на практическое занятие приведены в табл. 10.

Задача 1. Для использования в моноимпульсном радиолокаторе с суммарно-разностной обработкой сигнала предложена плоская коммутационная ФАР отражательного типа, обеспечивающая на фиксированной длине волны λ следующие характеристики $\theta_{ск}$, $2\theta_{0,5}^\circ$, $F_{б.м}$.

Требуется:

- 1) рассчитать размеры ФАР ($2a, f, 2v_0$);
- 2) выбрать форму элемента и вычислить его размеры;
- 3) определить количество элементов;
- 4) найти необходимый дискрет фазы;
- 5) рассчитать потери усиления ФАР и максимальный уровень паразитных лепестков.

Таблица 10

№ по списку	λ , см	$2\theta_{0,5}^\circ$, град	$\theta_{СК}$, град	$F_{б.м}$, дБ	Вид расположения элементов
1	3	1	18	≤ 25	В углах прямоугольной сетки
2	6	1,5	21	$\leq 22,5$	
3	9	2	24	≤ 20	
4	12	1	27	≤ 25	
5	15	1,5	18	$\leq 22,5$	
6	18	2	21	≤ 20	
7	3	1	24	≤ 25	В углах треугольной сетки
8	6	1,5	27	$\leq 22,5$	
9	9	2	18	≤ 20	
10	12	1	21	≤ 25	
11	15	1,5	24	$\leq 22,5$	
12	18	2	27	≤ 20	
13	3	1	18	≤ 25	В углах прямоугольной сетки
14	6	1,5	21	$\leq 22,5$	
15	9	2	24	≤ 20	
16	12	1	27	≤ 25	
17	15	1,5	18	$\leq 22,5$	
18	18	2	21	≤ 20	
19	3	1	24	≤ 25	В углах треугольной сетки
20	6	1,5	27	$\leq 22,5$	
21	9	2	18	≤ 20	
22	12	1	21	≤ 25	
23	15	1,5	24	$\leq 22,5$	
24	18	2	27	≤ 20	
25	3	1	18	≤ 25	В углах прямоугольной сетки
26	6	1,5	21	$\leq 22,5$	
27	9	2	24	≤ 20	
28	12	1	27	≤ 25	
29	15	1,5	18	$\leq 22,5$	
30	18	2	21	≤ 20	

Решение задачи приведено в приложении 9 в виде методики общего расчета фазированной антенной решетки.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Классификация ФАР.
2. Схемы построения ФАР.
3. Фазовый способ качания луча.
4. Частотный способ качания луча.
5. Способы размещения излучателей в раскрыве ФАР.
6. Эквивалентные площади излучателей.
7. Взаимная связь излучателей в ФАР.
8. Многолучевые антенные решетки.

Рекомендуемая литература

1. Шифрин Я.С. Антенны: Учеб. пособие. Харьков: ВИРТА ПВО, 1976. С. 322–365.
2. Марков Л.Н. и др. Антенные системы радиоэлектронной техники. М: Воениздат, 1993. С. 226–264.
3. Долбик А. И. Устройства СВЧ и антенны: Учеб. пособие. СПб: ФВУ ПВО, 2004. Ч.2: Антенные системы РЭС РТВ. С. 40–69.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 9 ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕННЫХ СИСТЕМ ПРИ ИХ ПОВРЕЖДЕНИИ

Время: 2 часа.

Учебные и воспитательные цели

1. Закрепить знания обучающихся, полученные на лекции, о влиянии повреждений антенных систем на их характеристики и параметры.
2. Выработать у обучаемых навыки в решении задачи оценки характеристик и параметров зеркальной антенны при ее повреждении.
3. Сформировать практические навыки применения ПЭВМ для оценки характеристик и параметров ФАР при ее повреждении.
4. Воспитать у обучающихся самостоятельность в работе, уверенность в своих силах.

Рассматриваемые вопросы

1. Влияние повреждений и отказов на радиотехнические характеристики и параметры зеркальных антенн.

2. Влияние повреждений и отказов элементов ФАР на характеристики и параметры антенн.

Методические указания по подготовке и проведению занятия

Данное практическое занятие базируется на материале лекции "Влияние метеорологических факторов, повреждений и отказов элементов антенных систем на их радиотехнические характеристики и параметры".

При отработке первого вопроса закрепляется материал по влиянию механических повреждений зеркальных антенн на их радиотехнические характеристики и параметры, проводится сравнительный анализ изменения РТХ при различных повреждениях. В рамках этого вопроса решается комплексная задача.

Индивидуальные задания на практическое занятие приведены в табл. 11.

Задача 1. Параболическая антенна с осесимметричным зеркалом ($2R_0, f$) работает на частоте f_0 . Определить:

- 1) допуск на отклонение профиля зеркала от расчетной кривой в центре зеркала (допустимую глубину обширной центральной неглубокой вмятины) – $h_{\text{дон ц}}$;
- 2) допуск на отклонение профиля зеркала от расчетной кривой на краю зеркала (допустимую глубину обширной неглубокой вмятины на краю зеркала) – $h_{\text{дон нц}}$;
- 3) допуск на точность установки облучателя в фокусе параболоида (допустимое смещение облучателя) – $\Delta Z_{\text{дон}}$.

Решение. Допустимые значения точности искривления зеркала и смещения облучателя определяются из условия непревышения фазовых ошибок значения $\pi/4$. В центральной части зеркала допустимый размер вмятины равен:

$$h_{\text{дон ц}} \leq \lambda / 32 , \quad (23)$$

На краю зеркала допуск на отклонение профиля определяется выражением:

$$h_{\text{дон нц}} \leq \lambda / 16(1 + \cos \vartheta_0) , \quad (24)$$

где ϑ_0 – половина угла раскрыва зеркала.

Значение ϑ_0 можно определить из геометрических соотношений в зеркальной антенне, приведенных на рис. 5:

$$\vartheta_0 = \arctg \frac{R_0}{f} . \quad (25)$$

Допустимое вертикальное смещение облучателя определяется выражением:

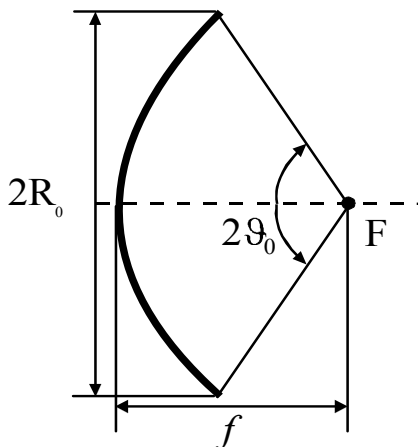


Рис. 5

Таблица 11

№ по списку	f_0 , ГГц	$2R_0$, м	f , м
1	1	6	2
2	5	8	3
3	10	10	4
4	1	12	5
5	5	16	2
6	1	6	3
7	5	8	4
8	1	10	5
9	5	12	2
10	1	16	3
11	5	6	4
12	10	8	5
13	1	10	2
14	5	12	3
15	10	16	4
16	1	6	5
17	5	8	2
18	10	10	3
19	1	12	4
20	5	16	5
21	1	6	2
22	5	8	3
23	1	10	4
24	5	12	5
25	1	16	2
26	5	6	3
27	10	8	4
28	1	10	5
29	5	12	2
30	10	16	3

$$\Delta z_{\text{дон}} = \frac{1}{8(1 - \cos \vartheta_0)}. \quad (26)$$

Допуск на точность установки облучателя по горизонтали рассчитывается по формуле:

$$\Delta x_{\text{дон}} = \frac{1}{8 \sin \vartheta_0}. \quad (27)$$

В рамках второго вопроса производится анализ влияния повреждений элементов ФАР на основные радиотехнические характеристики и параметры фазированной антенной решетки. При этом с использованием ПЭВМ решается задача по оценке изменения РТХ вследствие различных повреждений ФАР.

Задача 2. Оценить влияние выхода из строя элементов ФАР на ее диаграмму направленности. Исходные данные:

число излучателей – 100; дискретность установки фазы – $22,5^\circ$;
тип излучателей – изотропный; расстояние между излучателями – $0,5\lambda$;
амплитудное распределение равномерное.

Требуется оценить изменение ширины ДН, уровня БЛ при условии: повреждения элементов ФАР (устанавливаются значения количества вышедших из строя элементов в процентах – 0, 10, 20, 40, 60);

наличия погрешности установки амплитуды (устанавливаются значения погрешности в процентах – 0, 10, 20, 40, 60);

установки фазы с погрешностью амплитуды (устанавливаются значения погрешности в процентах – 0, 10, 20, 40, 60).

Необходимо зафиксировать значения РТП в каждом случае, выполнить по два-три рисунка диаграммы направленности по каждому типу повреждений.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Влияние центральной вмятины на РТХ зеркальной антенны.
2. Влияние нецентральной вмятины на РТХ зеркальной антенны.
3. Влияние повреждений облучателя на РТХ зеркальной антенны.
4. Виды повреждений и отказов элементов ФАР.
5. Влияние отказов элементов ФАР на ее РТХ.

Рекомендуемая литература

2. Марков Л.Н. и др. Антенные системы радиоэлектронной техники. М: Воениздат, 1993. С. 285–299.

3. Долбик А. И. Устройства СВЧ и антенны: Учеб. пособие. СПб: ФВУ ПВО, 2004. Ч.2: Антенные системы РЭС РТВ. С. 80–89.

ПРИЛОЖЕНИЯПриложение 1МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНЫХ АНТЕНН*1. Традиционные методы.*

В настоящее время для измерения ДН антенн, как правило, применяют методы вращающейся или неподвижной антенны.

При первом методе исследуемая антенна (ИА) устанавливается на поворотное устройство, а вспомогательная антенна (ВА), обычно устанавливаемая на вышке, неподвижна и ориентирована максимумом ДН на ИА. Приемник, подключенный к ИА, регистрирует зависимость величины принятого сигнала, излученного ВА, от угла поворота ИА.

Данный метод удобен в лабораторных условиях и при заводских испытаниях. В войсковых условиях он применяется для измерений ДН в азимутальной плоскости. Однако этот метод не позволяет получить пространственную ДН антенны РЭС, в частности ДН в угломестной плоскости.

При втором методе ИА неподвижна и вокруг нее в определенной плоскости перемещается ВА. В процессе измерений максимум ДН ВА сохраняет ориентацию на ИА.

При использовании обоих методов важно согласование по поляризации ИА с ВА. В процессе измерений необходимо поддерживать стабильность работы передатчика и постоянство усиления приемника. Метод неподвижной антенны реализуют в наземных условиях (ВА перемещается вдоль поверхности земли) или с помощью самолетов либо вертолетов (метод облета).

Метод облета. ВА размещается на борту летательного аппарата. Определенные трудности представляет контроль пространственной ориентации бортовой антенны (максимума ДН) и измерение ее пространственных координат. Для контроля ориентации максимума диаграммы направленности ВА можно установить рядом с ИА антенну опорного канала с заранее известными характеристиками (ДН, КУ). Она может быть слабонаправленной или иметь коэффициент усиления, соизмеримый с КУ ИА. При наличии антенны опорного канала нет необходимости измерять параметры ВА. Изменение ориентации главного максимума ВА повлечет за собой соответствующее изменение принимаемой мощности от калиброванной антенны опорного канала.

Наличие антенны опорного канала (эталонной антенны – ЭД) позволяет измерить КУ ИА методом сравнения. Для этого необходимо сориентировать максимумы ДН ИА и ЭА на ВА, согласовать ИА в ЭА с фидерным трактом, с тем чтобы обеспечить равенство подводимых к этим антеннам мощностей. При данных условиях плотности потока мощности, создаваемые ИА и ЭА в области ВА, будут пропорциональны коэффициентам усиления исследуемой G_u и эталонной $G_э$ антенн. Определяя показания индикатора α_u и $\alpha_э$ на выходе квадратичного детектора бортовой аппаратуры при приеме сигналов поочередно от ИА и ЭА и зная величину $G_э$, можно рассчитать G_u по формуле:

$$G_u = G_э \frac{\alpha_u}{\alpha_э}. \quad (28)$$

Метод облета требует наличия специальной аппаратуры, значительных временных затрат на измерения и связан с организационными сложностями. Вместе с тем он позволяет измерять КУ и ДН в различных плоскостях с учетом влияния земной поверхности, местных предметов и в ряде случаев является единственно возможным для измерения и контроля характеристик антенн в войсковых условиях.

Недостатки традиционных методов антенных измерений заключаются в следующем:

при их использовании расстояние между ИА и ВА должно удовлетворять условию дальней зоны: $r_0 \geq 2L^2 / \lambda$. С увеличением габаритов современных антенн выполнить его становится все труднее;

существует необходимость уменьшения влияния отражений от земли и окружающих объектов на результаты измерения ДН в свободном пространстве;

создание специального оборудования для ВА и осуществление связи между ИА и ВА связано с определенными сложностями;

данные методы характеризуются слабой скрытностью.

В связи с этим разрабатываются новые методы антенных измерений. Их внедрение новых методов антенных измерений стимулируется тем, что антенны современных РЭС сложны и дорогостоящи и требуют периодического контроля их характеристик в ходе эксплуатации.

Новые методы измерений параметров антенн можно разделить на две большие группы – методы измерений параметров антенн на сокращенных рас-

стояниях и радиометрические методы.

2. Методы измерения параметров антенн на сокращенных расстояниях

К ним относятся метод фокусировки, коллиматорный метод, методы определения параметров антенн по измерениям поля в ближней зоне (их называют также фазометрическими, апертурно-зондовыми).

Суть метода фокусировки состоит в том, что в раскрыве исследуемой антенны (рис. 6) устанавливают (дополнительно к исходному) квадратичное фазовое распределение с опережением к краям антенны

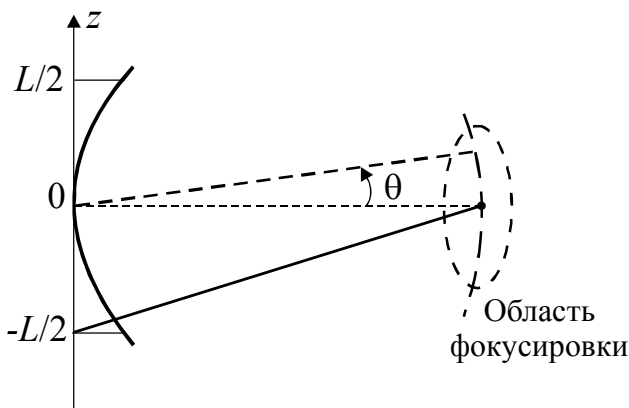


Рис. 6

$$\varphi(z) = \frac{kz^2}{2r_\phi} \cos^2 \theta_\phi, \quad (29)$$

где z – координата раскрыва; $k=2\pi/\lambda$; r_ϕ , θ_ϕ – координата точки фокусирования, расположенной в зоне Френеля (на рис. 6 $\theta_\phi=0$). Такое фазовое распределение позволяет в некоторой окрестности точки фокусирования (области фокусировки) добиться компенсации квадратичной фазовой составляющей, присутствующей в разности хода волн для точек наблюдения в зоне Френеля.

Поэтому фазовые соотношения для полей от излучателей антенны в этих точках получаются такими же, как и для дальней зоны антенны, когда лучи от системы до точки наблюдения считаются параллельными.

Угловое распределение поля в пределах области фокусировки повторяет угловое распределение поля в дальней зоне антенны с исходным АФР. Размеры области фокусировки определяются соотношением:

$$\alpha |\cos^2 \theta - \cos^2 \theta_\phi| \leq 1, \quad (30)$$

где коэффициент Френеля $\alpha = (2L^2 / \lambda) / r_\phi$ показывает, во сколько раз расстояние до дальней зоны больше расстояния до точки фокусирования.

Таким образом, задаваясь значениями r_ϕ , θ_ϕ и устанавливая в раскрыве антенны фазовое распределение (29), можно измерить в области (30) обычными методами ДН антенны в дальней зоне в требуемом угловом секторе.

Коллиматорный метод основан на использовании того факта, что при размещении ВА в дальней зоне на ИА в режиме приема падает плоская однородная волна, которую можно получить с помощью коллиматора-линзы или зеркала с облучателем в фокусе (рис. 7). Сферический (или цилиндрический) фронт излу-

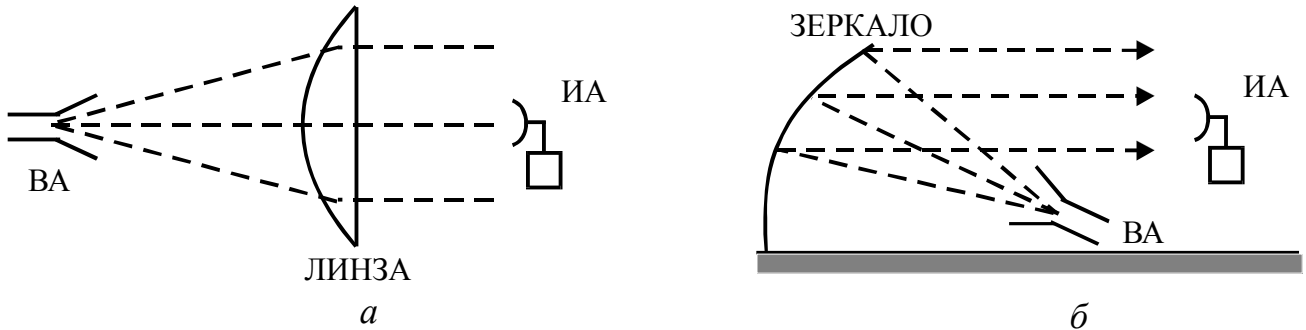


Рис. 7

емой облучателем волны преобразуется коллиматором в плоский. ДН ИА, работающей в режиме приема и расположенной в поле плоской волны, измеряется методом вращающейся антенны. Для того чтобы обеспечить в пределах раскрытия исследуемой антенны достаточно однородный фронт волны, размеры коллиматора должны в 2–3 раза превышать размеры ИА.

Данный метод, в целом малопригодный в войсковых условиях, является эффективным и экономичным при испытаниях серийных антенн на полигонах заводов-изготовителей.

При фазометрическом методе производятся измерения поля в ближней зоне антенны на некоторой поверхности (плоской, цилиндрической или сферической) и после соответствующей обработки результатов этих измерений определяются параметры в дальней зоне.

Широкое применение находят косвенные методы измерения АФР, например измерение только мощности (интенсивности) поля. В войсковых условиях для контроля параметров антенн можно осуществлять обработку результатов регистрации ближнего поля с помощью ЭВМ, находящихся в составе РЭС. Наиболее простым является алгоритм при измерении ближнего поля антенны на плоскости (планарные измерения).

С точки зрения контроля характеристик антенны в процессе эксплуатации РЭС, зачастую оказывается достаточным измерение АФР (или интенсивности) в раскрытии антенны. Если измеренное поле не превышает допустимых отклонений от эталонного значения, то, очевидно, отпадает необходимость в определении ДН

антенны и ее параметров. Для текущего контроля исправности антенны, как правило, можно ограничиться проверкой работоспособности ее наиболее ненадежных элементов или узлов (например, в ФАР – фазовращателей, усилителей или в целом каналов излучателей).

3. *Радиометрические методы измерения параметров антенн* основаны на использовании в качестве вспомогательной передающей антенны либо космических источников радиоизлучения (радиоастрономические методы), либо искусственных источников – так называемых "черных дисков" (метод "черного диска"). В последнем случае в качестве ВА используется искусственный источник шумового поля. Он представляет собой щит определенной конфигурации и размеров, изготовленный из поглощающих ЭМВ материалов.

Эти источники излучают сигналы, сходные по своей структуре с внутренними шумами приемника. Исследуемая антенна работает в режиме приема шумового поля, излучаемого источниками, что приводит к изменению ее шумовой температуры ($T_{\text{АИ}}$). Параметры исследуемой антенны определяются путем измерений и анализа шумовой температуры или ее приращения. Величина $T_{\text{АИ}}$, определяемая внешними источниками, зависит от ориентации ДН антенны, так как с изменением направления главного максимума изменяется "шумовая обстановка" в пределах телесных углов, занимаемых главным и боковыми лепестками ДН.

С этой целью применяют специальные приемники-радиометры, которые отличается тем, что в их состав входит устройство компенсации внутренних шумов.

По измеренной шумовой температуре антенны или ее приращению можно определить ДН, КУ и КПД антенны.

**МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ
НА РАСЧЕТ МНОЖИТЕЛЯ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

Задача 1. Рассчитать и построить нормированный множитель непрерывной синфазной линейной системы длиной L при длине волны λ и равномерном амплитудном распределении. Определить уровень первого и второго боковых лепестков и ширину основного лепестка по нулям.

Дано: $L=60$ см, $\lambda=12$ см, $A(x)=1$, $\varphi(x)=0$.

Требуется: построить $F_{сист}(\psi)$, $F_{сист}(\theta)$; найти $F_{\theta 1}$, $F_{\theta 2}$, $2\theta_0$.

Решение. Исследуемая система представлена на рис. 8.

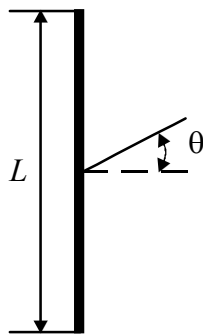


Рис. 8

Аналитическое выражение для множителя системы (МС) имеет вид:

$$F_{сист}(\psi) = \left| \frac{\sin \psi}{\psi} \right|, \quad (31)$$

где $\psi = \frac{\pi L}{\lambda} \sin \theta$ – приведенная угловая координата (при этом реальный угол $\theta = \arcsin \frac{\psi \lambda}{\pi L}$).

График функции $\left| \frac{\sin \psi}{\psi} \right|$ приведен на

рис. 9 (верхняя часть графика).

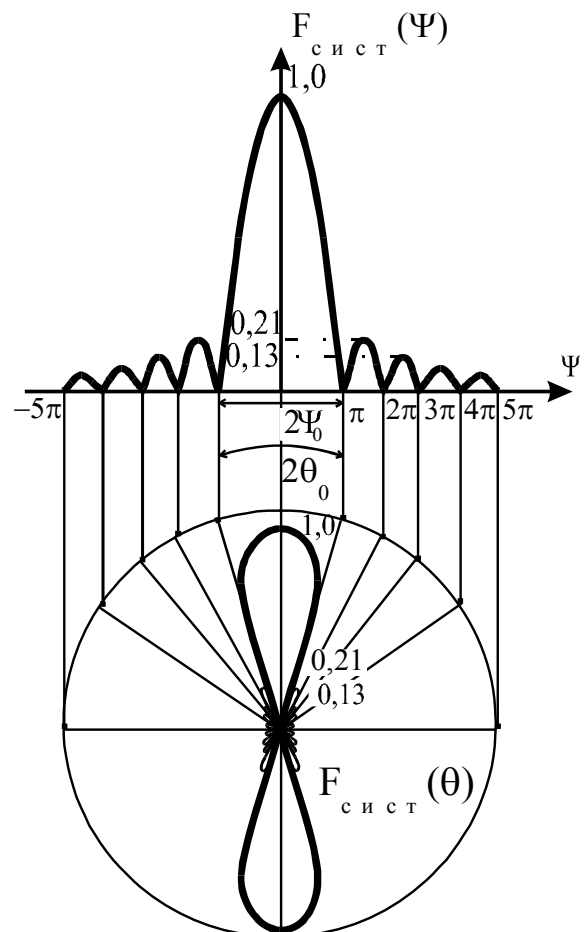


Рис. 9

1. Нули множителя системы определяются из условия $\sin \psi = 0$ (при $\psi \neq 0$):

$$\psi_{0n} = n\pi, \text{ где } n=1, 2, \dots \quad (32)$$

Интервал $-\pi \leq \psi \leq \pi$ занимает главный лепесток; следовательно, $2\psi_0 = 2\pi$.

2. Рабочий интервал углов ψ , соответствующий диапазону углов θ от -90° до $+90^\circ$, рассчитывается из соотношения:

$$(\pi L / \lambda) \sin(-90^\circ) \leq \psi \leq (\pi L / \lambda) \sin(90^\circ). \quad (33)$$

В нашем случае интервал составляет $-5\pi \leq \psi \leq 5\pi$.

Таким образом, в рабочем интервале находится главный лепесток и восемь боковых (по четыре с каждой стороны от главного).

3. Максимумы боковых лепестков расположены примерно посередине между их нулями, поэтому $\psi_{\delta 1} = 3\pi/2$, $\psi_{\delta 2} = 5\pi/2$.

4. Уровни боковых лепестков $F_{\delta 1}$, $F_{\delta 2}$ вычисляются по формуле (31):

$$F_{\delta 1} = F_{\text{сист}}(\psi_{\delta 1}) = \frac{\sin \psi_{\delta 1}}{\psi_{\delta 1}} = \frac{\sin 3\pi/2}{3\pi/2} = 0,21 \text{ (21\%)}, \quad (34)$$

$$F_{\delta 2} = F_{\text{сист}}(\psi_{\delta 2}) = 0,13 \text{ (13\%)}. \quad (35)$$

5. По $F_{\text{сист}}(\psi)$ строится $F_{\text{сист}}(\theta)$ (см. рис. 9, нижняя часть графика).

6. Ширина главного лепестка "по нулям" $2\theta_0$ рассчитывается по выражению (33):

$$2\theta_0 = 2 \arcsin \frac{\psi_0 \lambda}{\pi L} = 2 \arcsin \frac{\pi \lambda}{\pi L} = 2 \arcsin 0,2 = 23^\circ. \quad (35)$$

Задача 2. Определить, как изменится диаграмма направленности линейной антенной системы в условиях задачи 1, если ее длину уменьшить в 2 раза.

Дано: $L=30$ см, $\lambda=12$ см, $A(x)=1$, $\varphi(x)=0$.

Требуется: построить $F_{\text{сист}}(\psi)$, $F_{\text{сист}}(\theta)$; найти $F_{\delta 1}$, $F_{\delta 2}$, $2\theta_0$.

Решение.

1. Аналитическое выражение для множителя системы не меняется:

$$F_{\text{сист}}(\psi) = \left| \frac{\sin \psi}{\psi} \right|.$$

Следовательно, сохраняет свою форму график множителя, положение нулей

и максимумов, уровни боковых лепестков.

2. В выражении $\psi = \frac{\pi L}{\lambda} \sin \theta$ в два

раза уменьшается отношение L/λ , которое влияет на рабочий диапазон углов ψ и ширину главного лепестка $2\theta_0$:

$$-2,5\pi \leq \psi \leq 2,5\pi.$$

Это означает, что в рабочей области углов ψ и θ укладывается не девять лепестков, как в предыдущем случае, а только четыре: один главный и по полтора боковых с каждой стороны.

3. Строятся графики $F_{сист}(\psi)$ и $F_{сист}(\theta)$ (рис. 10).

4. Определяется ширина главного лепестка "по нулям" $2\theta_0$:

$$2\theta_0 = 2 \arcsin \frac{\psi_0 \lambda}{\pi L} = 2 \arcsin 0,4 = 48^\circ.$$

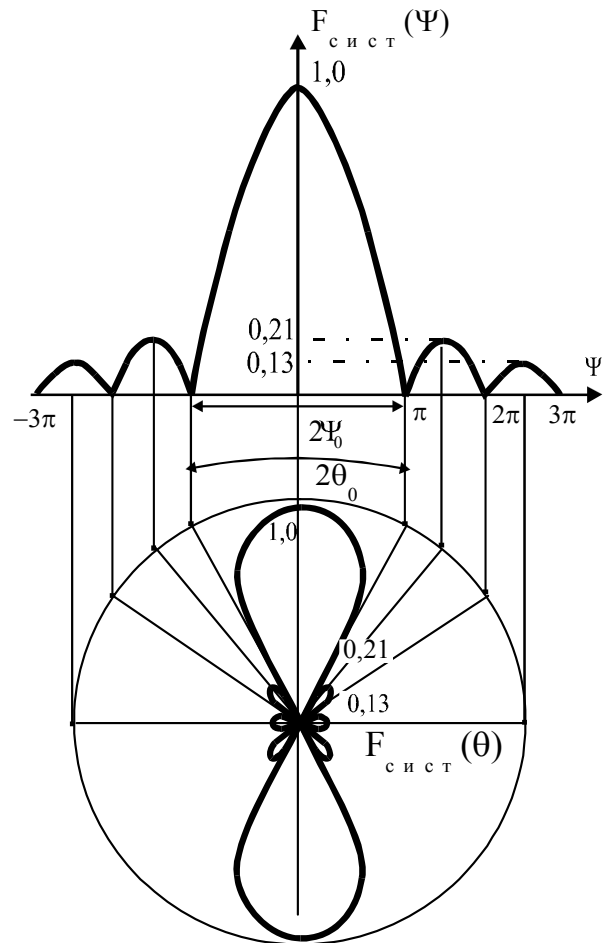


Рис. 10

Вывод: при укорочении линейной непрерывной системы излучателей в 2 раза уменьшается примерно в 2 раза уровень боковых лепестков и во столько же раз расширится главный лепесток множителя системы.

Задача 3. Что произойдет с множителем системы в условиях задачи 2, если равномерное амплитудное распределение заменить косинусным?

Дано: $L=30$ см, $\lambda=12$ см, $A(x)=\cos(\pi/2)x$, $\varphi(x)=0$, $L/\lambda=2,5$.

Требуется: построить $F_{сист}(\psi)$, $F_{сист}(\theta)$; найти $F_{\bar{b}1}$, $F_{\bar{b}2}$, $2\theta_0$.

Решение.

I. Изменяется аналитическое выражение для множителя системы:

$$F_{сист}(\psi) = \left| \frac{\cos \psi}{1 - (2\psi / \pi)^2} \right|, \quad (36)$$

где $\psi = \frac{\pi L}{\lambda} \sin \theta$ – приведенная угловая координата.

II. Изменится и график множителя, в частности положение нулей, максимумов боковых лепестков и их уровни.

1. Нули множителя системы определяются из условия $\cos \psi = 0$. Следовательно,

$$\psi_{0n} = (2n + 1)\pi / 2, \text{ где } n=1, 2, \dots \quad (37)$$

$$\text{Тогда } \psi_{01} = 3\pi/2, \psi_{02} = 5\pi/2.$$

Значение $\psi = \pi/2$ входит в пределы главного лепестка и не является нулевым. Следует заметить, что нуль главного лепестка соответствует $\psi_{01} = 3\pi/2$, а не π , как в случае равномерного амплитудного распределения, т.е. главный лепесток по нулям расширяется в 1,5 раза.

2. Максимумы боковых лепестков находятся между нулями, т.е. $\psi_{\delta 1} = 2\pi$, $\psi_{\delta 2} = 3\pi$ и т.д.

3. Уровни боковых лепестков рассчитываются по формуле (36):

$$F_{\delta 1} = F_{сист}(\psi_{\delta 1}) = \frac{\cos \psi_{\delta 1}}{1 - (2\psi_{\delta 1} / \pi)^2} = \frac{\cos 2\pi}{1 - (2 * 2\pi / \pi)^2} = 0,07 \text{ (7\%)}; \quad (38)$$

$$F_{\delta 2} = F_{сист}(\psi_{\delta 2}) = 0,03 \text{ (3\%)}. \quad (39)$$

III. Строятся графики $F_{сист}(\psi)$ и $F_{сист}(\theta)$ (рис. 11).

IV. Рабочий диапазон углов ψ при данных условиях остается тем же, что и в задаче 2 ($-2,5\pi \leq \psi \leq 2,5\pi$), так как величины в выражении (33) не изменились. Однако в этот диапазон кроме главного лепестка вошло только по одному боковому с каждой стороны.

V. Ширина главного лепестка "по нулям" равна:

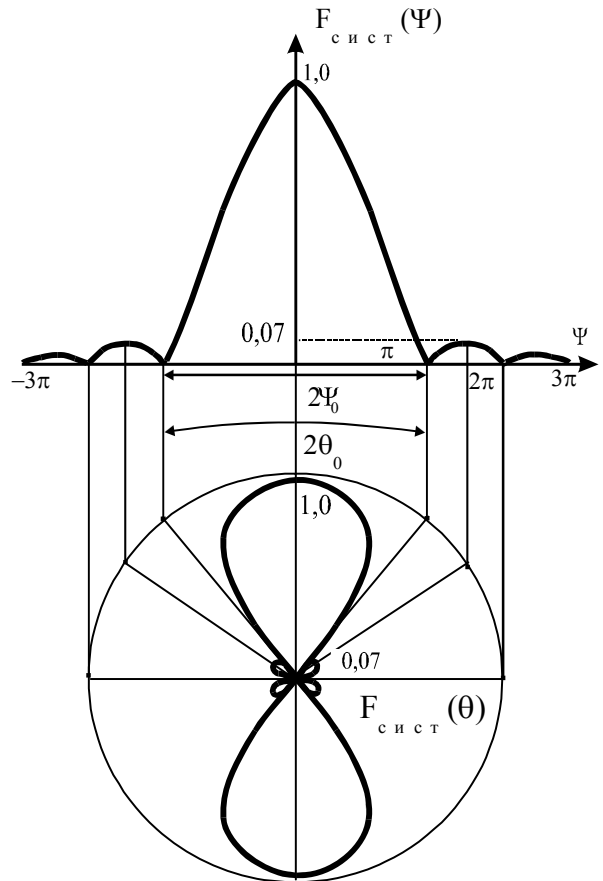


Рис. 11

$$2\theta_0 = 2 \arcsin \frac{\psi_0 \lambda}{\pi L} = 2 \arcsin \frac{1,5\pi\lambda}{\pi L} = 2 \arcsin 0,6 = 74^\circ. \quad (39)$$

Задача 4. Определить, что произойдет с множителем системы в условиях задачи 2, если синфазное распределение заменить прямофазным $\varphi(x) = ax$, причем $a=\pi$.

Дано: $L=30$ см, $\lambda=12$ см, $A(x)=1$, $\varphi(x) = ax$, $a=\pi$, $L/\lambda=5$.

Требуется: построить $F_{сист}(\psi)$, $F_{сист}(\theta)$; найти F_{θ_1} , F_{θ_2} , $2\theta_0$; оценить форму главного лепестка.

Решение.

1. Формула для множителя системы принимает форму, учитывающую фазовое распределение по линейному закону:

$$F_{сист}(\psi) = \left| \frac{\sin(\psi - \varphi_1)}{\psi - \varphi_1} \right|, \quad (40)$$

где $\psi = \frac{\pi L}{\lambda} \sin \theta$ – приведенная угловая

координата, $\varphi_1 = a = \pi$.

2. Положение максимума главного лепестка МС соответствует условию $(\sin 0)/0 = 1$, т.е. $\psi - \varphi_1 = 0$. Отсюда следует, что $\psi = \varphi_1$. Это значит, что максимум главного лепестка имеет абсциссу, равную π , и весь график МС сдвинут вправо на величину π , при этом его форма не меняется.

3. Смещение вправо максимума диаграммы направленности по координате ψ означает поворот его по часовой стрелке по координате θ на величину θ_m ,

определяемую из условия (40): $\psi_m = \frac{\pi L}{\lambda} \sin \theta_m$. Следовательно,

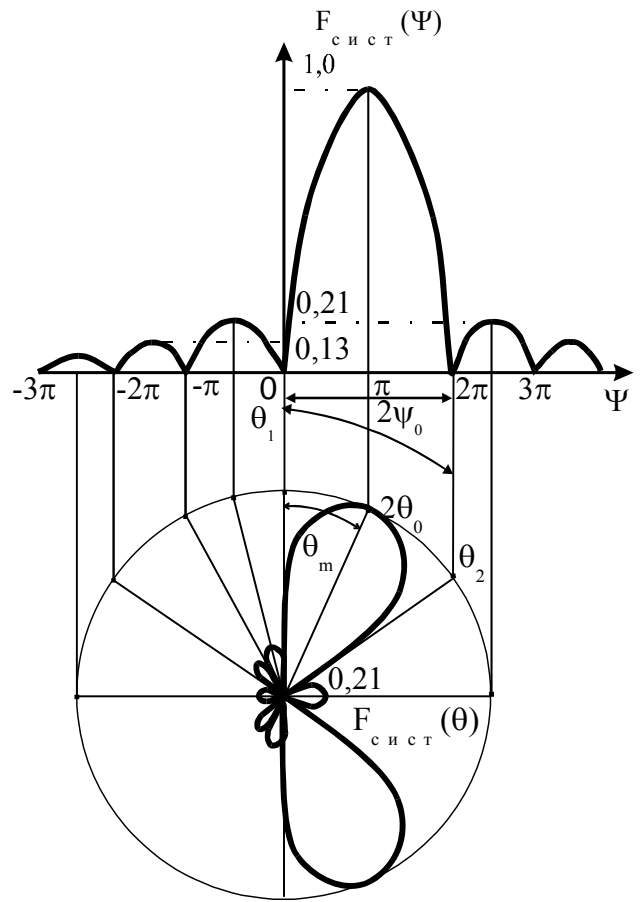


Рис. 12

$$\theta_m = \arcsin \frac{\psi_m \lambda}{\pi L} = \arcsin 0,4 = 24^\circ. \quad (41)$$

4. Рабочая область углов ψ остается прежней, т.е. $-2,5\pi \leq \psi \leq 2,5\pi$. Также не изменяются значения $\psi_0, F_{\psi_1}, F_{\psi_2}$.

5. Строятся графики $F_{\text{суст}}(\psi)$ и $F_{\text{суст}}(\theta)$ (рис. 12).

6. Ширина главного лепестка $2\theta_0$ определяется как разность $\theta_2 - \theta_1$ (в нашем примере $\theta_1 = 0$):

$$2\theta_0 = \theta_2 - \theta_1 = \arcsin \frac{\psi_0 \lambda}{\pi L} = \arcsin \frac{2\pi \lambda}{\pi L} = 53^\circ. \quad (42)$$

В случае прямофазной системы $2\theta_0 = 59^\circ$ (вместо 48° при синфазной системе).

Выводы:

1) главный лепесток отклоняется от нормали на угол θ_m тем больше, чем больше значение φ_1 ;

2) главный лепесток $F_{\text{суст}}(\theta)$ значительно расширяется и становится асимметричным (но в координатах ψ остается симметричным).

Задача 5. Как будет выглядеть множитель линейной системы в условиях задачи 1, если вместо непрерывной ее сделать дискретной, а расстояние между элементарными излучателями выбрать равным длине волны?

Дано: $L=60$ см, $\lambda=12$ см, $d=12$ см, $A(x)=1$, $\alpha=0$, $L/\lambda=5$.

Требуется: построить $F_{\text{суст}}(\psi)$, $F_{\text{суст}}(\theta)$; найти $F_{\psi_1}, F_{\psi_2}, 2\theta_0$.

Решение.

1. Множитель линейной эквидистантной антенной решетки с равномерным амплитудным распределением имеет вид:

$$F_{\text{суст}}(\psi) = \left| \frac{\sin N\psi/2}{N \sin \psi/2} \right|, \quad (43)$$

где $\psi = kd \sin \theta = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta$ – приведенная угловая координата, $N = \frac{L}{d} + 1 = 6$.

Это периодическая функция, период которой составляет 2π . Ширина главных максимумов $2\psi_0 = 2\pi / (N/2) = 4\pi / N$.

Между главными максимумами расположены убывающие к середине интервала 2π боковые лепестки, ширина каждого из которых равна $2\pi/N = \pi/3$, а количество $N-2=4$.

2. Нулевые значения функции имеют координаты $\psi_0 = \frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}, \pi,$

$\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}, \dots$, кроме значений $2\pi, 4\pi$

и т.д.

3. Максимумы боковых лепестков находятся посередине между нулями, т. е.

$$\psi_{\delta 1} = \frac{1,5\pi}{3}, \psi_{\delta 2} = \frac{2,5\pi}{3} \dots$$

4. Уровни боковых лепестков рассчитываются по формуле (43):

$$F_{\delta 1} = F_{сист}(\psi_{\delta 1}) = \left| \frac{\sin N\psi_{\delta 1}/2}{N \sin \psi_{\delta 1}/2} \right| = 0,24;$$

$$F_{\delta 2} = F_{сист}(\psi_{\delta 2}) = 0,18 \text{ (18\%)}.$$

5. Рабочий интервал углов ψ , соответствующий диапазону углов θ от -90° до $+90^\circ$, определяется из соотношения:

$$kd \sin(-90^\circ) \leq \psi \leq kd \sin(90^\circ). \quad (44)$$

Следовательно, этот интервал лежит в пределах $-2\pi \leq \psi \leq 2\pi$.

6. Строятся графики $F_{сист}(\psi)$ и $F_{сист}(\theta)$ (рис. 13).

7. Определяется ширина главного лепестка "по нулям":

$$2\theta_0 = 2 \arcsin \frac{\psi_0}{kd} = 2 \arcsin 1/6 = 21^\circ. \quad (45)$$

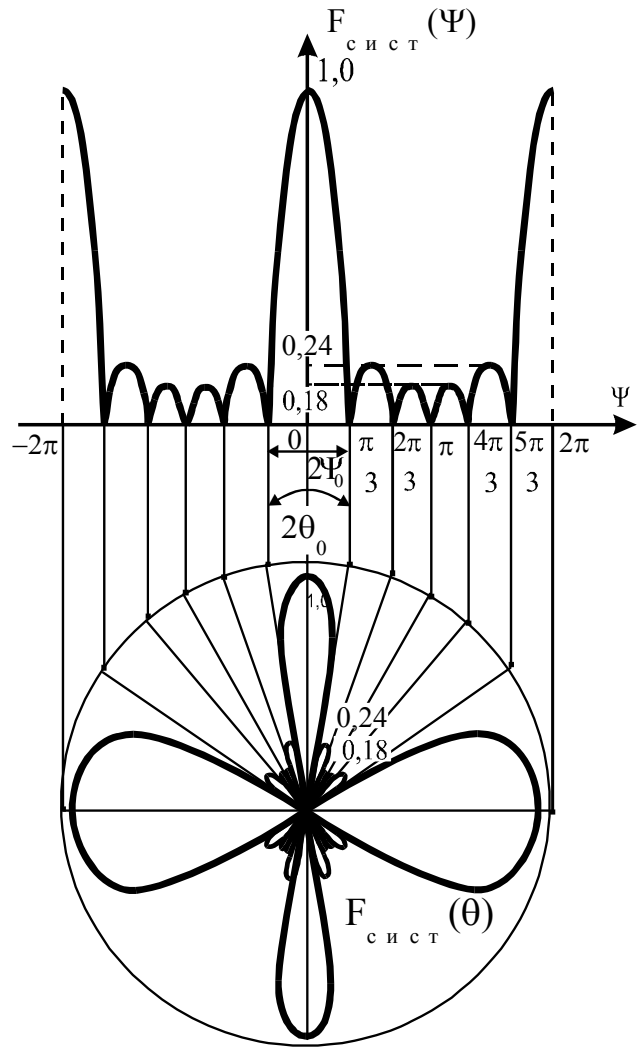


Рис. 13

ОБЩАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ДИРЕКТОРНОЙ АНТЕННЫ

Целью расчета является определение количества вибраторов в антенне, их длин и расстояний между ними (рис. 14). Исходные данные – $2\theta_{0,5p}$, λ .

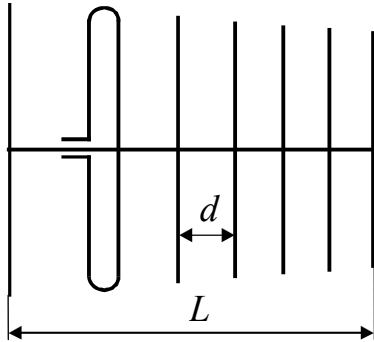


Рис. 14

1. По заданному значению $2\theta_{0,5p}$ и длине волны λ находится ориентировочная длина антенны L . Связь между $2\theta_{0,5p}$ и L/λ задается графиком (рис. 16).

2. Вычисляется среднее расстояние между вибраторами d_{cp} из следующих соображений: если количество директоров $n_d \leq 3$, то $d_{cp} = 0,15\lambda$; если $n_d > 3$, то $d_{cp} = 0,27\lambda$.

3. По L и d_{cp} определяется общее число вибраторов: $N = (L + d_{cp})/d_{cp}$.

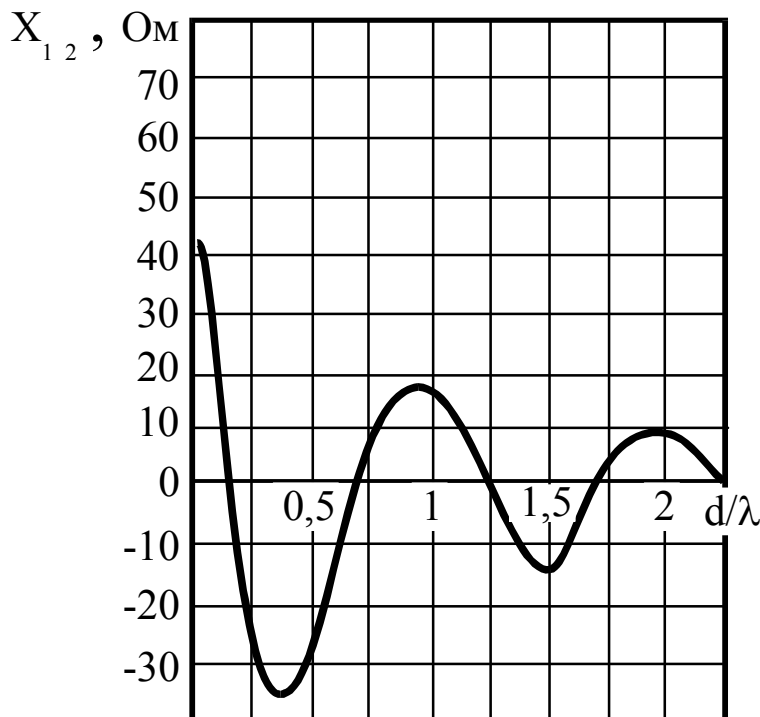


Рис. 15

4. Рассчитываются взаимные сопротивления между активным вибратором и остальными вибраторами по графику, представленному на рис. 15. Расстояние между вибраторами выбирается в диапазоне

$d = (0,1 \dots 0,2)\lambda$ при $n_d \leq 3$
и $d = (0,2 \dots 0,34)\lambda$ при $n_d > 3$.

5. Задаются значения активных сопротивлений

всех вибраторов (73 Ом), а реактивные выбираются в следующих диапазонах: $X_{ref} = (0 \dots 40)$ Ом; $X_{дир} = -(0 \dots 40)$ Ом; $X_{акт} = 0$.

6. По значениям реактивных сопротивлений с помощью графиков (рис. 17)

определяются длины всех вибраторов.

7. Вычисляется укорочение активного вибратора: $\frac{\Delta}{l_a} = \frac{27}{\rho_A} \left(1 + \frac{X_{\text{внос}}}{42,5} \right)$.

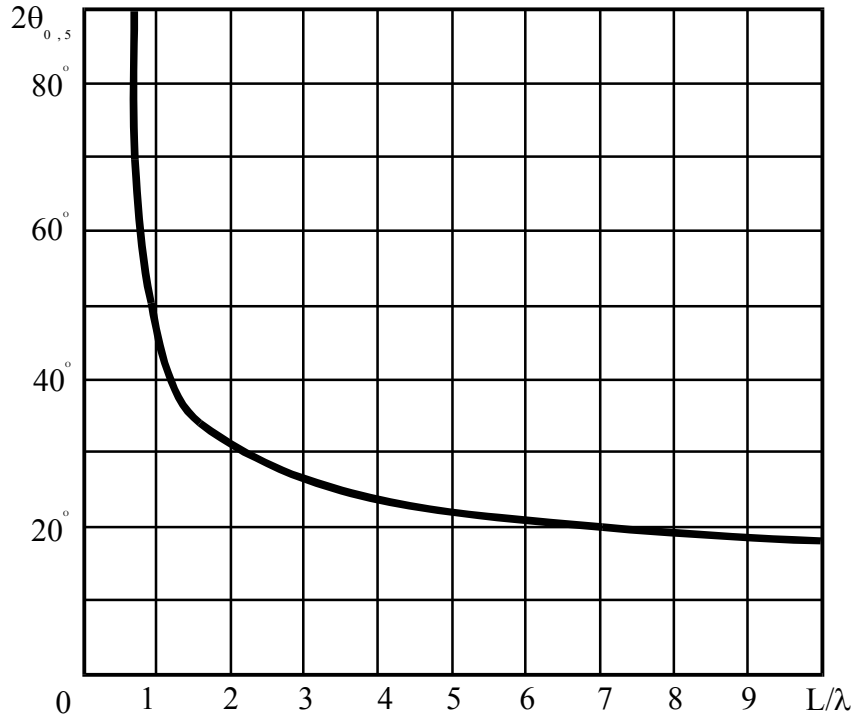


Рис. 16

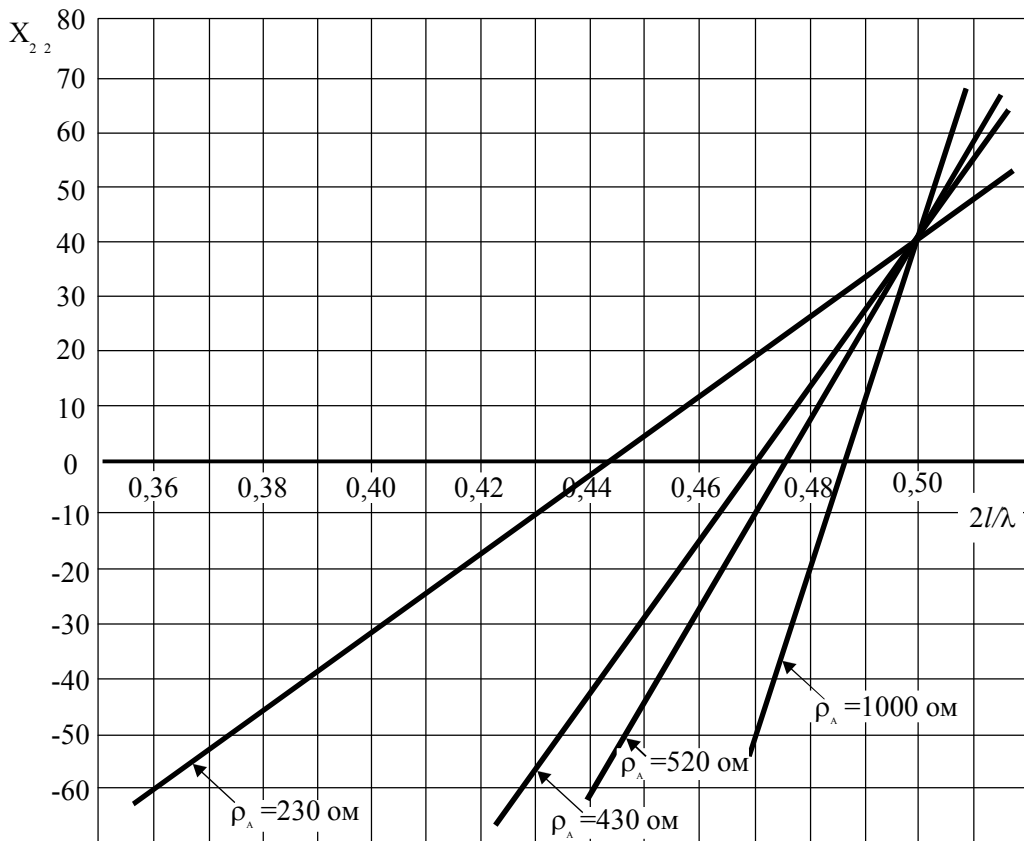


Рис. 17

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ДИРЕКТОРНОЙ АНТЕННЫ

1. По заданным значениям λ , N и d_{cp} записываются выражения для ДНА в двух взаимно перпендикулярных плоскостях θ_E и θ_H :

$$f(\theta_E) = 60 \left| \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right) \cdot \sin\left[\frac{N+2}{2} kd_{cp}(1-\cos \theta)\right]}{\cos \theta \cdot \sin\left[\frac{1}{2} kd_{cp}(1-\cos \theta)\right]} \right|; \quad (46)$$

$$f(\theta_H) = 60 \left| \frac{\sin\left[\frac{N+2}{2} kd_{cp}(1-\cos \theta)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2} kd_{cp}(1-\cos \theta)\right]} \right|. \quad (47)$$

2. Определяются значения $2\theta_{0,5p}$ для плоскостей E и H. Приближенная оценка $2\theta_{0,5p}$ осуществляется по формуле:

$$2\theta_{0,5p} = B\sqrt{\lambda/L}, \quad (48)$$

где B – коэффициент, зависящий от L/λ . При $L/\lambda=1,5\dots 10,2$ – $B=56^\circ\dots 71^\circ$.

3. Коэффициент направленного действия оценивается в соответствии с выражением:

$$D_{\max} = A \frac{L}{\lambda}. \quad (49)$$

При $L/\lambda=1\dots 7$ значение коэффициента составляет $A=10\dots 5$.

4. По значениям λ и d рассчитываются взаимные сопротивления вибраторов Z_{mn} .

5. Составляется и решается система уравнений для токов в вибраторах. Вычисляется АФР токов (при $N>3$ – с помощью ЭВМ).

6. Определяется входное сопротивление антенны:

$$Z_{ex} = Z_{AB} + \sum_{n=1}^N \frac{I_n}{I_{AB}} Z_{AB-n}. \quad (50)$$

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ

1. Для длины волны λ выбирается стандартный волновод из условия: $\lambda/2 < a < \lambda$ (см. таблицу в приложении 6).

2. Рассчитывается критическая длина волны в волноводе: $\lambda_{кр} = 2a$.

3. Определяется длина волны в волноводе:

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}}. \quad (51)$$

4. Необходимое число щелей в волноводе

$$N = \frac{D_{\max}}{3,2}. \quad (52)$$

5. Выбирается ширина щели (из условия $d = (0,03 \dots 0,15)\lambda$): $d = 0,1\lambda$.

6. Рассчитывается волновое сопротивление щели, Ом:

$$\rho_A = 120 \left(\ln \frac{4\lambda}{\pi \cdot d} - 0,577 \right). \quad (53)$$

7. Укорочение щели вычисляется как: $2\Delta = 2 \cdot \frac{42,5 \cdot \lambda}{2\pi \cdot \rho_A}$.

8. Длина щели с учетом укорочения $l = (\lambda/2) - 2\Delta$.

9. Нормированная диаграмма направленности в плоскости Н для $\lambda_g/2$ при размещении продольных щелей в шахматном порядке на широкой стенке волновода (π -способ питания) определяется выражением:

$$F(\theta)_H = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right)}{\cos \theta} \cdot \frac{\sin \frac{N\psi}{2}}{N \sin \frac{\psi}{2}}, \quad (54)$$

где $\psi = k(\lambda_g/2) \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\lambda_g}{2} \sin \theta$ (соответственно для 2π -способа $\psi = k\lambda_g \sin \theta$).

Задаваясь значениями θ , строим график $F(\theta)_H$; по нему определяется ширина ДН ($2\theta_{0,5p}$).

СТАНДАРТЫ ДЛЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ

Тип волновода	Диапазон частот для основного типа волн, ГГц	Диапазон основного типа волн, см	Внутренние размеры, мм		Толщина стенок, мм
			ширина	высота	
МЭК-3	0,32-0,49	93,7-61,2	584,2	292,10	-
МЭК-4	0,35-0,53	85,7-56,6	533,4	266,70	-
МЭК-5	0,41-0,62	73,2-48,4	457,2	228,60	-
МЭК-6	0,49-0,75	61,2-40,0	381,0	190,50	-
МЭК-8	0,64-0,98	46,9-30,6	292,1	146,05	-
МЭК-9	0,76-1,15	39,5-26,1	247,65	123,82	-
МЭК-12	0,96-1,46	31,2-20,5	195,58	97,79	-
МЭК-14	1,14-1,73	26,3-17,3	165,10	82,55	2,030
МЭК-18	1,45-2,20	20,7-13,6	129,54	65,77	2,030
МЭК-22	1,72-2,61	17,4-11,5	109,22	54,61	2,030
МЭК-26	2,17-3,30	13,8-9,09	86,36	43,18	2,030
МЭК-32	2,60-3,95	11,5-7,59	72,14	34,04	2,030
МЭК-40	3,22-4,90	9,32-6,12	58,17	29,083	1,625
МЭК-48	3,94-5,99	7,61-5,01	47,55	22,149	1,625
МЭК-58	4,64-7,05	6,46-4,25	40,39	20,193	1,625
МЭК-70	5,38-8,17	5,58-3,67	34,85	15,799	1,625
МЭК-84	6,57-9,99	4,57-3,00	28,499	12,624	1,625
МЭК-100	8,20-12,5	3,66-2,40	22,86	10,160	1,270
МЭК-120	9,84-15,0	3,05-2,00	19,05	9,525	1,270
МЭК-140	11,9-18,0	2,52-1,67	15,799	7,899	1,015
МЭК-180	14,5-22,0	2,07-1,36	12,954	6,477	1,015
МЭК-220	17,6-26,7	1,77-1,12	10,668	4,318	1,015
МЭК-260	21,7-33,0	1,38-0,90	8,636	4,318	1,015
МЭК-320	26,4-40,0	1,14-0,75	7,112	3,556	1,015
МЭК-400	32,9-50,1	0,91-0,60	5,690	2,845	1,015
МЭК-500	39,2-59,6	0,76-0,50	4,775	2,388	1,015
МЭК-620	49,8-75,8	0,60-0,40	3,759	1,880	1,015
МЭК-740	60,5-91,8	0,50-0,33	3,099	1,549	1,015
МЭК-900	83,8-112	0,36-0,27	2,540	1,270	1,015
МЭК-1200	92,2-140	0,325-0,214	2,332	1,016	1,015
МЭК-1400	114-173	0,263-0,173	1,651	0,826	-
МЭК-1800	145-220	0,21-0,136	1,295	0,648	-
МЭК-2200	172-261	0,174-0,115	1,092	0,846	-
МЭК-2600	217-330	0,138-0,09	0,864	0,432	-

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ.1. Методика расчета зеркальной параболической антенны
полного профиля

Расчет, как правило, производится по заданным:

ширине ДН в одной из плоскостей ($2\theta_{0,5pH}$ или $2\theta_{0,5pE}$);

допустимому уровню первого бокового лепестка ДН ($F_{\delta 1}$);

длине волны (λ).

При этом требуется определить профиль и геометрические размеры зеркала, рассчитать облучатель и линию передачи энергии.

Порядок расчета

1.1. Расчет геометрических размеров и профиля зеркала.

1.1.1. На рис. 18, 19 соответственно представлены графики диаграмм направленности параболоида вращения в Н- и Е-плоскостях, полученные экспериментально для нескольких значений отношения радиуса апертуры антенны к параметру параболы (R_0/p). Основные радиотехнические параметры для каждого случая сведены в табл. 12 и 13 соответственно.

Таблица 12

R_0/p	$\psi_{0,5p}$	$2\theta_{0,5p}$, рад	$2\theta_{0,5p}$, град	КИП	$F_{\delta n}$, дБ	
					первый БЛ	второй БЛ
0,4	1,67	$1,06 \lambda / 2R_0$	$60,8 \lambda / 2R_0$	0,98	-	-
0,6	1,73	$1,1 \lambda / 2R_0$	$63,1 \lambda / 2R_0$	0,84	-16	-20
0,8	1,9	$1,21 \lambda / 2R_0$	$69,4 \lambda / 2R_0$	0,66	-24	-29
1,0	2,17	$1,38 \lambda / 2R_0$	$79,1 \lambda / 2R_0$	0,47	-27	-30

Таблица 13

R_0/p	$\psi_{0,5p}$	$2\theta_{0,5p}$, рад	$2\theta_{0,5p}$, град	КИП	$F_{\delta n}$, дБ	
					первый БЛ	второй БЛ
0,4	1,73	$1,1 \lambda / 2R_0$	$63,1 \lambda / 2R_0$	0,98	-	-
0,6	1,95	$1,24 \lambda / 2R_0$	$71,1 \lambda / 2R_0$	0,84	-16	-20
0,8	2,27	$1,44 \lambda / 2R_0$	$82,5 \lambda / 2R_0$	0,66	-24	-29
1,0	2,63	$1,67 \lambda / 2R_0$	$95,7 \lambda / 2R_0$	0,47	-27	-30

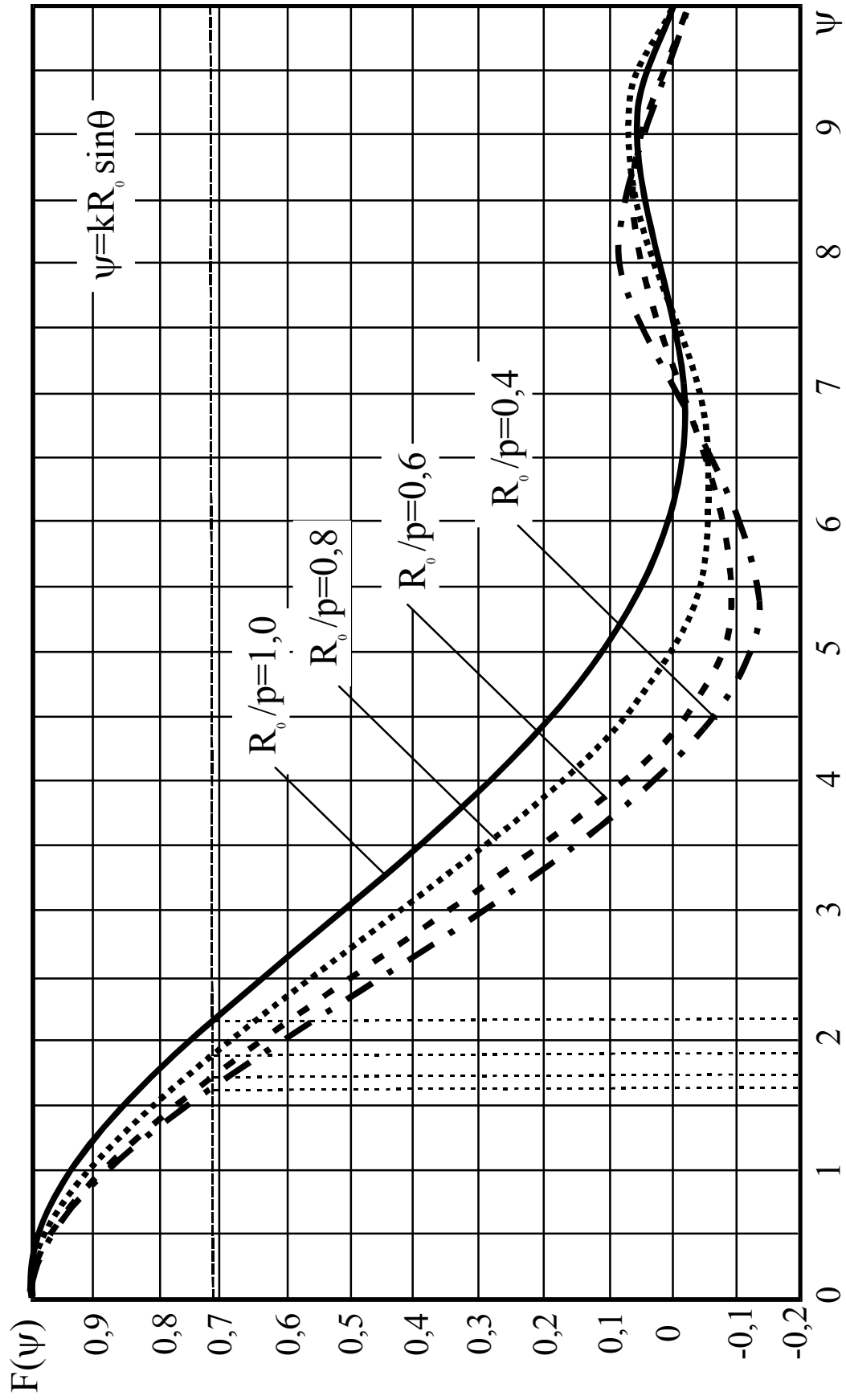


Рис. 18

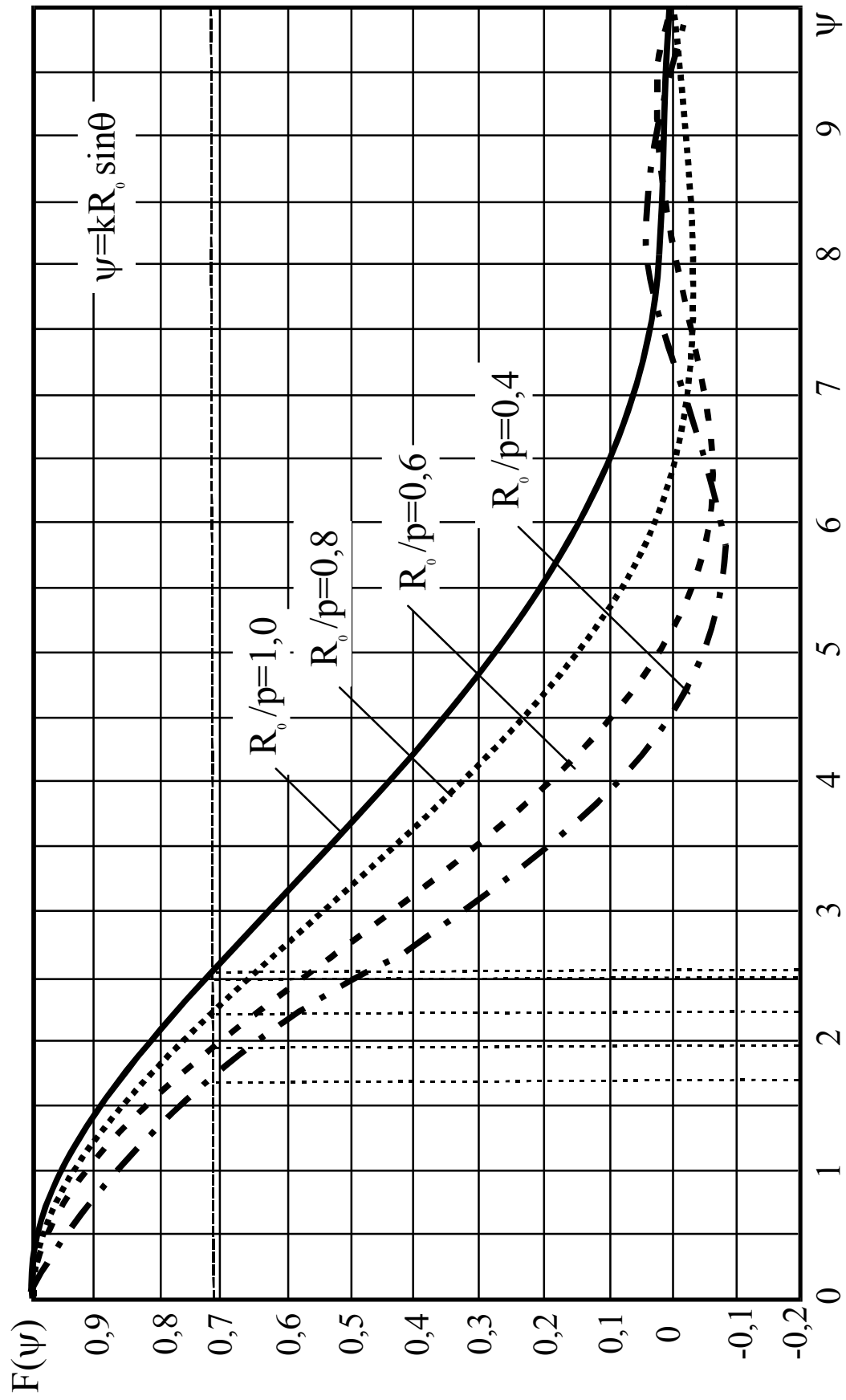


Рис. 19

По заданному уровню первого бокового лепестка $F_{\sigma 1}$ необходимо выбрать соответствующую ДН и определить значение $a_0=R_0/p$.

1.1.2. По заданной ширине диаграммы направленности ($2\theta_{0,5pH}$ или $2\theta_{0,5pE}$) с помощью соответствующих графиков или таблиц определяется значение обобщенной угловой координаты ($\psi_{0,5pH}$ или $\psi_{0,5pE}$). Связь этих значений определяется выражениями:

$$\psi_{0,5pH} = kR_0 \sin \theta_{0,5pH}, \quad \psi_{0,5pE} = kR_0 \sin \theta_{0,5pE}, \quad (55)$$

где $k=2\pi/\lambda$ – волновое число.

1.1.3. Определяется радиус раскрыва зеркала:

$$R_0 = \frac{\psi_{0,5p}}{k \sin \theta_{0,5p}}. \quad (56)$$

1.1.4. По полученным значениям a_0 и R_0 вычисляются параметр и фокусное расстояние параболы:

$$p = R_0 / a_0; \quad f = p / 2. \quad (57)$$

1.1.5. Рассчитывается и строится профиль зеркала с использованием уравнения параболы:

$$x^2 = 2pz; \quad z \geq 0. \quad (58)$$

1.1.6. Определяется угол раскрыва зеркала по формуле:

$$2\vartheta_0 = 4 \arctg \frac{R_0}{p}. \quad (59)$$

1.2. Расчет облучателя.

1.2.1. Выбирается тип облучателя. Обычно, для дециметрового и сантиметрового диапазона волн в качестве облучателя используется рупорная антенна.

1.2.2. Параметры облучателя рассчитываются из условия облучения кромки зеркала 10%-ным уровнем мощности:

$$2\vartheta_{0,1p} = 2\vartheta_0, \quad (60)$$

где $2\vartheta_{0,1p}$ – ширина диаграммы направленности рупора по уровню мощности 0,1.

Величина $2\vartheta_{0,1p}$ для пирамидального рупора определяется по формулам:
в Н-плоскости –

$$2\mathcal{G}_{0,1pH} \approx (0,54 + 1,38 \frac{\lambda}{A}) \text{ рад} \approx (31 + 79 \frac{\lambda}{A}) \text{ град}; \quad (61)$$

в Е-плоскости –

$$2\mathcal{G}_{0,1pE} \approx 1,53 \frac{\lambda}{B} \text{ рад} \approx 88 \frac{\lambda}{B} \text{ град}, \quad (62)$$

где A и B – размеры рупора соответственно в Н- и Е-плоскостях.

Размеры рупора вычисляются по соотношениям:

$$A = \frac{79\lambda}{2\mathcal{G}_0 - 31}; \quad B = \frac{88\lambda}{2\mathcal{G}_0}. \quad (63)$$

Длина рупора, а также его максимальный КНД рассчитываются по формулам, приведенным в табл. 8.

1.2.3. Диаграмма направленности рупорного облучателя определяется по формулам:

$$F_H(\varphi) = \left| \frac{\cos((\pi A \sin \varphi) / \lambda) \cdot \frac{1 + \cos \varphi}{2}}{1 + (\pi A \sin \varphi) / \lambda} \right|; \quad (64)$$

$$F_E(\theta) = \left| \frac{\sin((\pi B \sin \theta) / \lambda) \cdot \frac{1 + \cos \theta}{2}}{(\pi B \sin \theta) / \lambda} \right|. \quad (65)$$

1.3. Расчет линии передачи энергии.

1.3.1. Составляется схема линии передачи.

1.3.2. Выбираются размеры волновода. Для этого используется таблица стандартов прямоугольных волноводов, приведенная в приложении 8.

1.3.3. Определяется предельная и допустимая мощность.

1.3.4. Выбираются элементы линии передач (переходы, изгибы, волноводные сочленения, согласующие устройства и др.), их количество, типы и параметры. Рассчитываются коэффициент затухания и коэффициент полезного действия линии передачи энергии.

2. Методика расчета зеркальной параболической антенны, формирующей косекансную ДН методом парциальных диаграмм

Исходные данные:

ширина ДН в горизонтальной плоскости ($2\theta_{0,5p}^{\Gamma}$);

допустимый уровень первого бокового лепестка ДН ($F_{\sigma 1}$);

длина волны (λ);

-требуемый коэффициент усиления (G_{\max});

-пределы создания веерной и косекансной ДН в вертикальной плоскости ($\theta_{\min}^B, \theta^B, \theta_{\max}^B$);

-излучаемая мощность.

Требуется рассчитать параметры зеркала, блока облучателей и линии передачи энергии.

Порядок расчета

2.1. Расчет геометрических размеров и профиля зеркала.

2.1.1. По заданному уровню первого бокового лепестка $F_{\delta 1}$ необходимо выбрать соответствующую ДН и определить значение $a_0=R_0/p$ по графикам, представленным на рис. 18, 19, или табл. 12, 13.

2.1.2. Для выбранной диаграммы определяется значение $\psi_{0,5pH}$ и рассчитывается горизонтальный размер раскрыва зеркала:

$$D_{\Gamma} = \frac{\psi_{0,5p\lambda}}{\pi \sin \theta_{0,5p}^{\Gamma}}. \quad (66)$$

2.1.3. По полученным значениям a_0 и D_{Γ} вычисляются параметр и фокусное расстояние параболы:

$$a = D_{\Gamma} / 2; \quad p = R_0 / a_0; \quad f = p / 2. \quad (67)$$

2.1.4. По заданному КУ антенны и горизонтальному размеру зеркала определяется вертикальный размер раскрыва:

$$D_B = \frac{G_{\max} \lambda^2}{4\pi D_{\Gamma} g_A}, \quad (68)$$

где g_A – коэффициент эффективности зеркальной антенны (для усеченного параболоида обычно принимают $g_A=0,3\dots 0,4$).

В том случае, когда коэффициент усиления не задан, можно использовать приближенную формулу:

$$D_B = \frac{D_{\Gamma}}{3}. \quad (69)$$

2.1.5. Рассчитывается и строится профиль зеркала в горизонтальной и вертикальной плоскостях с использованием выражений:

$$x^2 = 2pz; \quad y^2 = 2pz. \quad (70)$$

2.1.6. Вычисляются углы раскрыва зеркала в обеих плоскостях по формулам:

$$2\theta_0^{\Gamma} = 4 \operatorname{arctg} \frac{D_{\Gamma}}{2p}; \quad 2\theta_0^{\text{B}} = 4 \operatorname{arctg} \frac{D_{\text{B}}}{2p}. \quad (71)$$

2.2. Расчет блока облучателей.

2.2.1. Вычисляется ширина одной парциальной диаграммы в вертикальной плоскости для облучателя, расположенного в фокусе:

$$2\theta_{0,5p}^{\text{B}} = 70 \frac{\lambda}{D_{\text{B}}}. \quad (72)$$

2.2.2. Определяется количество парциальных диаграмм в веерной и косекансной частях ДН:

$$n_{\text{веер}} = \frac{\theta^{\text{B}} - \theta_{\min}^{\text{B}}}{2\theta_{0,5p}^{\text{B}} k_{1cp}}; \quad (73)$$

$$n_{\text{cossec}} = \frac{\theta_{\max}^{\text{B}} - \theta^{\text{B}}}{2\theta_{0,5p}^{\text{B}} k_{2cp}}, \quad (74)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты расширения парциальной диаграммы при выносе облучателя из фокуса (фактически величина обратная, коэффициенту редукции). Обычно принимают $k_{1cp}=1 \dots 1,2$; $k_{2cp}=1,2 \dots 1,5$.

2.2.3. Определяется количество зеркал, необходимых для создания парциальных диаграмм в пределах $(\theta_{\min}^{\text{B}}, \theta_{\max}^{\text{B}})$. Для этого рассчитывается максимальное смещение облучателей с учетом симметричного выноса первого и последнего из них:

$$\Delta x_{\max} = p \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{4} \leq 0,4 D_{\text{B}}. \quad (75)$$

Если условие (75) выполняется, выбирают одно зеркало, если не выполняется – два (как правило, одинаковых).

2.2.4. Рассчитывается смещение каждого облучателя:

$$\Delta x_n = p \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta_{mn}}{2}, \quad (76)$$

где θ_{mn} – направление максимального излучения n -й парциальной диаграммы.

Направление максимума каждой парциальной диаграммы с учетом расши-

рения за счет выноса облучателя из фокуса рассчитывается по формуле:

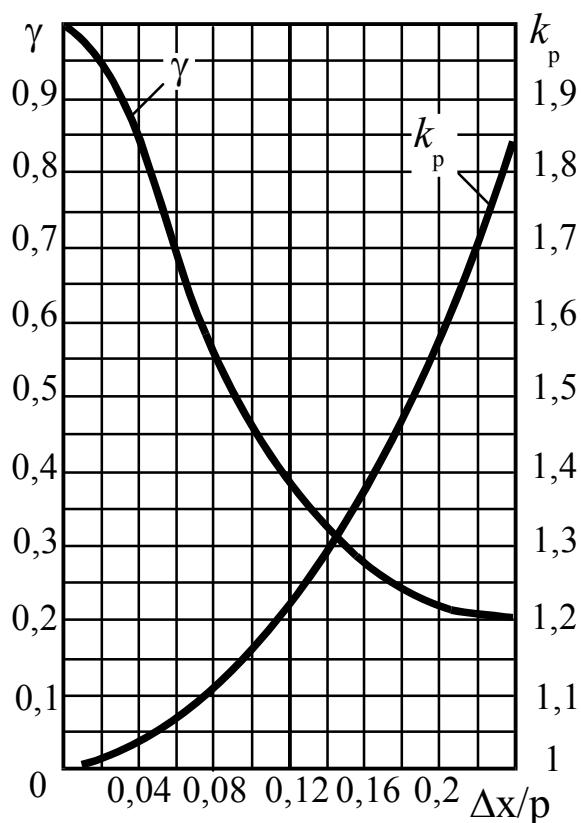


Рис. 20

$$\theta_{mn} = \theta_{m(n-1)} + 2\theta_{0,5p}k_{p(n-1)}, \quad (77)$$

где $k_{p(n-1)}$ – коэффициент расширения $(n-1)$ -й диаграммы, определяемый по графику зависимости расширения луча k_p и уменьшения усиления γ параболической антенны от смещения облучателя из фокуса $\Delta x/p$ (рис. 20).

Последовательно производя вычисления по формулам (76) и (77), уточняют количество парциальных диаграмм в ДН, а, следовательно, количество облучателей.

Если косекансная ДН формируется одним зеркалом, то в фокусе располагают облучатель, максимум диаграммы которого совпадает с направлением

θ^B ДН. Облучатели, смещенные вверх, формируют веерную, а смещенные вниз – косекансную часть ДН.

Если общая диаграмма формируется двумя зеркалами, то веерная часть создается нижним, а косекансная – верхним зеркалом. Фокальная ось нижнего зеркала поднимается на угол $\theta_{fn} \approx \theta^B / (3...4)$, фокальная ось верхнего зеркала – на угол $\theta_{fv} \approx \theta^B + (2...3)\theta_{0,5p}^B$.

2.2.5. Рассчитывается распределение мощности в парциальных диаграммах косекансной части ДН:

$$m_i = \frac{P_i}{P_B} = \left(\frac{\operatorname{cosec} \theta_{mi}}{\operatorname{cosec} \theta_{mB}} \right)^4 \left(\frac{\gamma_B}{\gamma_i} \right)^2, \quad (78)$$

где P_i – мощность, излучаемая i -м облучателем; P_B – мощность, излучаемая облучателем, формирующим начало косекансной части ДН; γ_B , γ_i – коэффициенты, учитывающие уменьшение усиления антенны при выносе облучателя из фокуса (определяются по графику, представленному на рис. 20).

Алгоритм расчета облучателя и линии передач аналогичен приведенному в п. п. 1.2, 1.3 настоящего приложения.

3. Методика расчета зеркальной параболической антенны, формирующей косекансную ДН с помощью зеркала специального профиля

Исходные данные:

ширина ДН в горизонтальной плоскости ($2\theta_{0,5p}^{\Gamma}$);

допустимый уровень первого бокового лепестка ДН (F_{θ_1});

длина волны (λ);

требуемый коэффициент усиления (G_{\max});

пределы создания веерной и косекансной ДН в вертикальной плоскости ($\theta_{\min}^{\text{В}}, \theta^{\text{В}}, \theta_{\max}^{\text{В}}$);

-тип зеркала (цилиндрическое или двойной кривизны).

В данном случае требуется определить конструктивные параметры зеркала двойной кривизны, блока облучателей и линии передачи энергии.

Порядок расчета

3.1. Расчет размеров и профиля зеркала в горизонтальной плоскости.

3.1.1. Горизонтальный размер раскрыва рассчитывается по формуле:

$$D_{\Gamma} \approx 70 \frac{\lambda}{2\theta_{0,5p}^{\Gamma}}. \quad (79)$$

3.1.2. Фокусное расстояние зеркала определяется выражением:

$$f \approx 0,35D_{\Gamma}. \quad (80)$$

3.1.3. Рассчитывается и строится профиль зеркала в горизонтальной плоскости с использованием выражения:

$$y^2 = 4fz. \quad (81)$$

3.1.4. Определяется угол раскрыва зеркала в горизонтальной плоскости:

$$2\theta_0^{\Gamma} = 4 \arctg \frac{D_{\Gamma}}{2f}. \quad (82)$$

3.2. Расчет размеров и профиля зеркала в вертикальной плоскости.

3.2.1. По заданному КУ антенны и горизонтальному размеру зеркала определяется вертикальный размер раскрыва:

$$D_B = \frac{G_{\max} \lambda^2}{4\pi D_{\Gamma} g_A}, \quad (83)$$

где величина коэффициента эффективности $g_A=0,3$.

В том случае, когда коэффициент усиления не задан, можно использовать приближенную формулу:

$$D_B = \frac{D_{\Gamma}}{3}. \quad (84)$$

3.2.2. Определяют углы раскрыва зеркала, принимая $D_{B1} \approx D_{B2} \approx D_B/2$ (см. рис. 21):

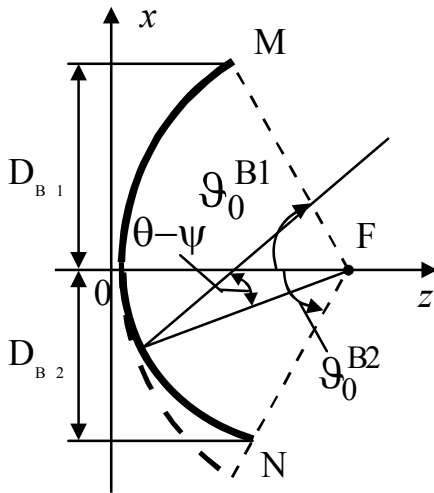


Рис. 21

$$g_0^{B1} = 2 \operatorname{arctg} \frac{D_{B1}}{2f}; \quad (85)$$

$$g_0^{B2} = 2 \operatorname{arctg} \frac{D_{B2}}{2f}.$$

3.2.3. В заданном секторе (θ_{\min}^B , θ_{\max}^B) строится косекансная ДН (пунктирная линия на рис. 22):

$$F^2(\theta) = \frac{\operatorname{cosec}^2 \theta}{\operatorname{cosec}^2 \theta^B}. \quad (86)$$

При конечных размерах зеркала не удастся получить идеальную косекансную диаграмму направленности, поэтому производится "сглаживание", (рис. 22,

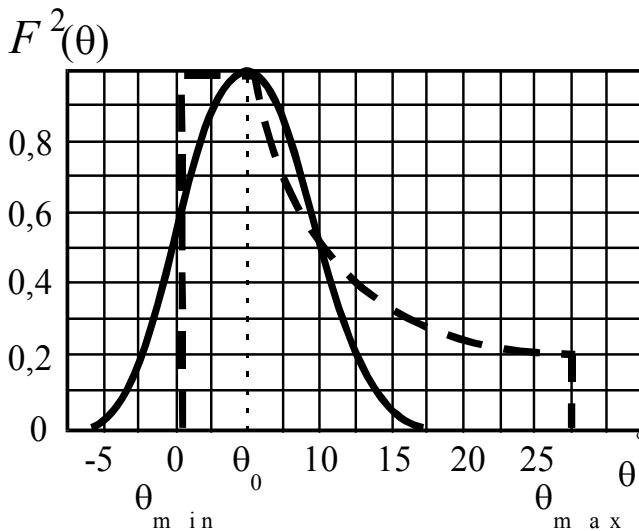


Рис. 22

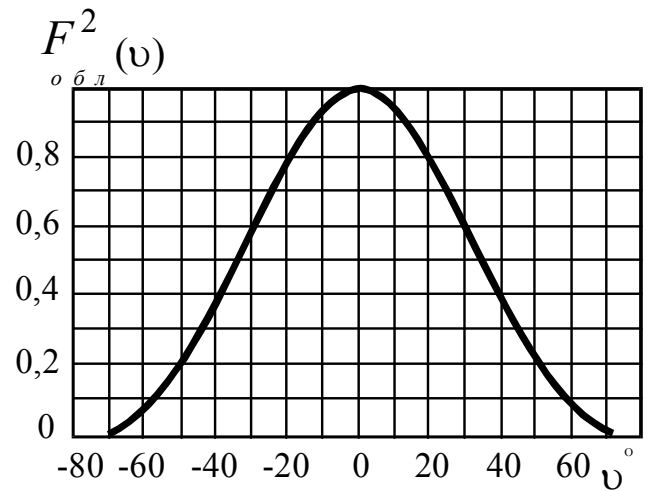


Рис. 23

сплошная кривая).

3.2.4. Строится ДН облучателя в вертикальной плоскости по мощности $F_{обл}^2(\vartheta)$ исходя из условия:

$$2\vartheta_{0,1}^{обл} = 4\arctg \frac{D_B}{2f}. \quad (87)$$

Соответствующий график диаграммы направленности приведен на рис. 23.

3.2.5. Определяется зависимость $\theta(\vartheta)$. Для этого необходимо вычислить левую и правую части уравнения баланса мощности

$$\Lambda_1 = \frac{\int_{\theta^B}^{\theta} F^2(\theta) d\theta}{\int_{\theta^B}^{\theta_{max}^B} F^2(\theta) d\theta} = \frac{\int_{\vartheta_1}^{\vartheta} F_{обл}^2(\vartheta) d\vartheta}{\int_{\vartheta_1}^{\vartheta_{B2}} F_{обл}^2(\vartheta) d\vartheta} = \Lambda_2 \quad (88)$$

и построить их на одном графике (рис. 24). Вычисление производится путем графического интегрирования с помощью графиков, представленных на рис. 22 и 23.

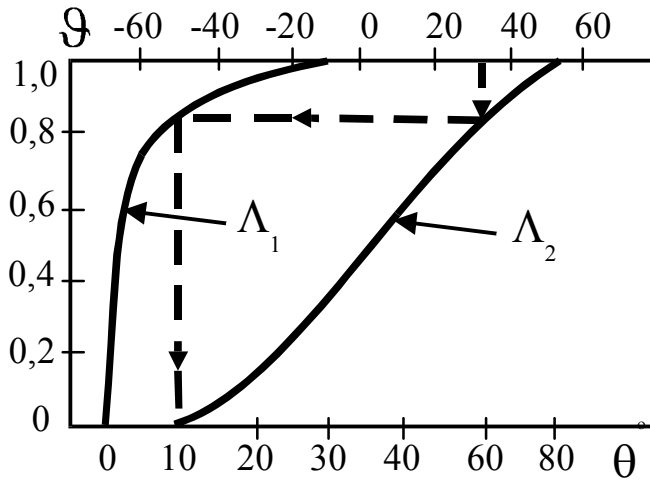


Рис. 24

Если фокальная ось зеркала OZ направлена под углом θ^B , то $\vartheta_1 = 0$. В остальных случаях принимается $\vartheta_1 = \theta^B - \theta_{ф.о.}$. Значение ϑ_{B2} соответствует величине θ_{max}^B .

По полученной зависимости $\theta(\vartheta)$ с помощью формулы

$$\ln \frac{\rho(\vartheta)}{f} = \int_0^{\vartheta} \operatorname{tg} \frac{\theta(\vartheta) - \vartheta}{2} d\vartheta \quad (89)$$

методом численного интегрирования рассчитывается профиль зеркала в вертикальной плоскости (плоскость XOZ на рис. 21).

Для определения профиля зеркала в вертикальных сечениях $A_1O_1B_1$, $A_2O_2B_2$ и т. д. (рис. 25) в формулу (89) вместо величины f подставляют значения ρ_1 , ρ_2, \dots, ρ_{2N} и т. д. (рис. 26), которые для ряда задаваемых значений z_1, z_2, \dots, z_N можно рассчитывать по формуле:

$$\rho_i = f + z_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (90)$$

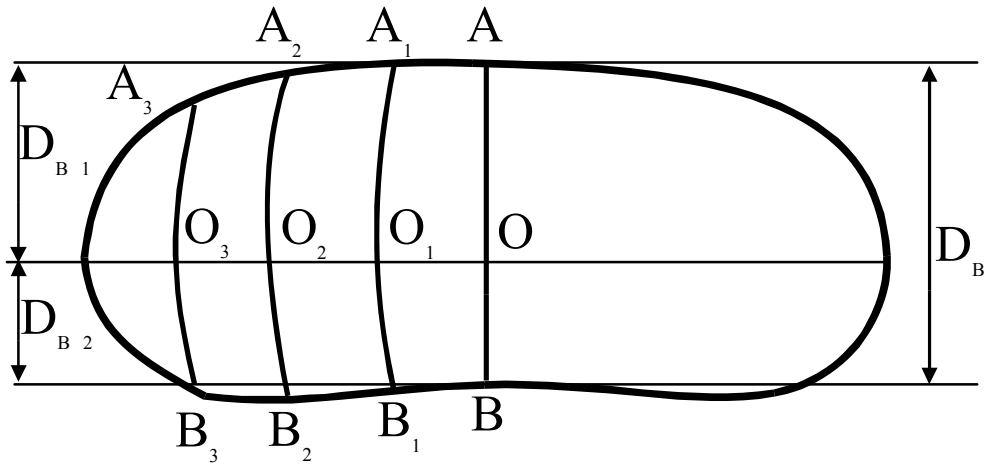


Рис. 25

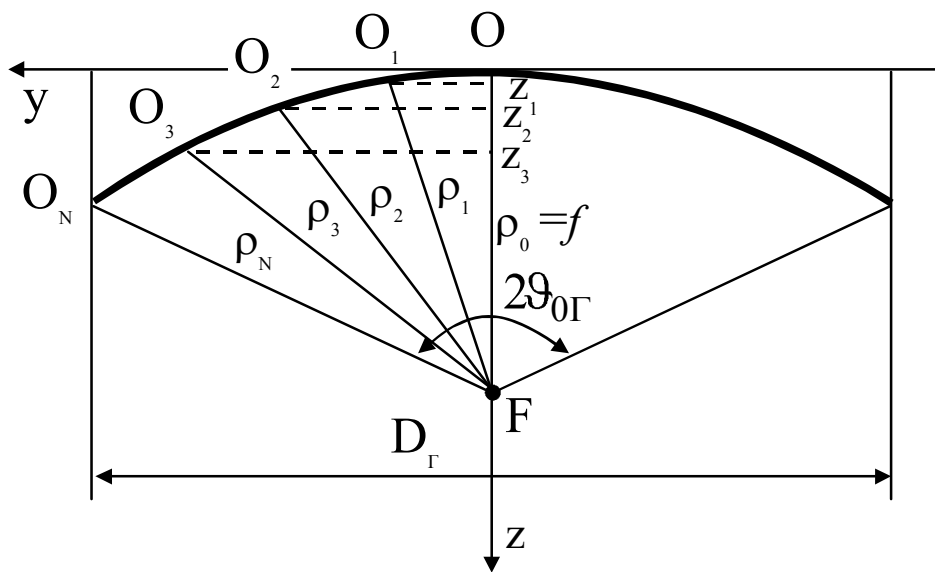


Рис. 26

Алгоритм расчета облучателя и линии передач аналогичен приведенному в п. п. 1.2, 1.3 настоящего приложения.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ТИПА

Общий вид ФАР отражательного типа приведен на рис. 27.

1. Расчет размеров ФАР.

Поперечные размеры рассчитываются исходя из выражения для ширины диаграммы направленности антенны при сканировании:

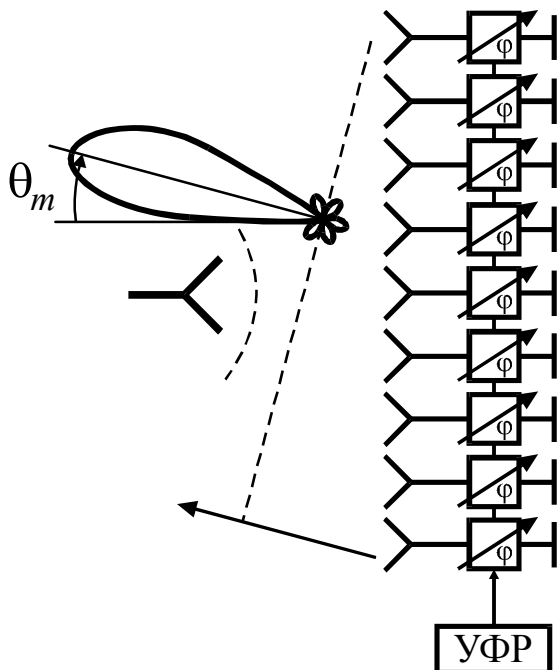


Рис. 27

$$2\theta_{0,5}^{\circ} = C_{0,5}^{\circ} \frac{\lambda}{2a} \cdot \frac{1}{\cos \theta_{ск}}, \quad (91)$$

где $\frac{1}{\cos \theta_{ск}} = \frac{1}{\cos \theta_{max}} = V_a$ – коэффициент, учитывающий расширение главного лепестка ДН при сканировании.

Следовательно,

$$\frac{2a}{\lambda} = \frac{C_{0,5}^{\circ}}{2\theta_{0,5}^{\circ} \cdot \cos \theta_{ск}}. \quad (92)$$

Для того чтобы рассчитать диаметр плоской круглой ФАР, необходимо найти коэффициент $C_{0,5}^{\circ}$, который

определяется амплитудным распределением на антенне. Кроме того, амплитудное распределение определяет и другие параметры антенны, в частности уровень боковых лепестков. Наиболее выгодное соотношение между шириной главного лепестка и уровнем боковых лепестков на практике позволяет получить квазиоптимальное амплитудное распределение. Чаще всего используется АР вида:

$$A(\rho) = \Delta + (1 - \Delta)(1 - \rho^2)^{2,4}, \quad (93)$$

где $0 \leq \Delta \leq 1$ – так называемый "пьедестал".

График зависимости $2\theta_{0,5}^{\circ}$, $F_{б.м}$, ξ_A от Δ приведен на рис. 28. В соответствии с уровнем $F_{б.м}$ выбирается коэффициент $C_{0,5}^{\circ}$. После этого определяется диаметр ФАР $2a$.

Для питания ФАР отражательного типа необходимо, чтобы блок облучателей располагался на расстоянии f_3 (эквивалентное фокусное расстояние ФАР), а

края антенны из фокуса были видны под углом ϑ_0 . Радиус ФАР, f_3 и ϑ_0 связаны простым соотношением:

$$\operatorname{tg} \nu_0 = a / f_3. \quad (94)$$

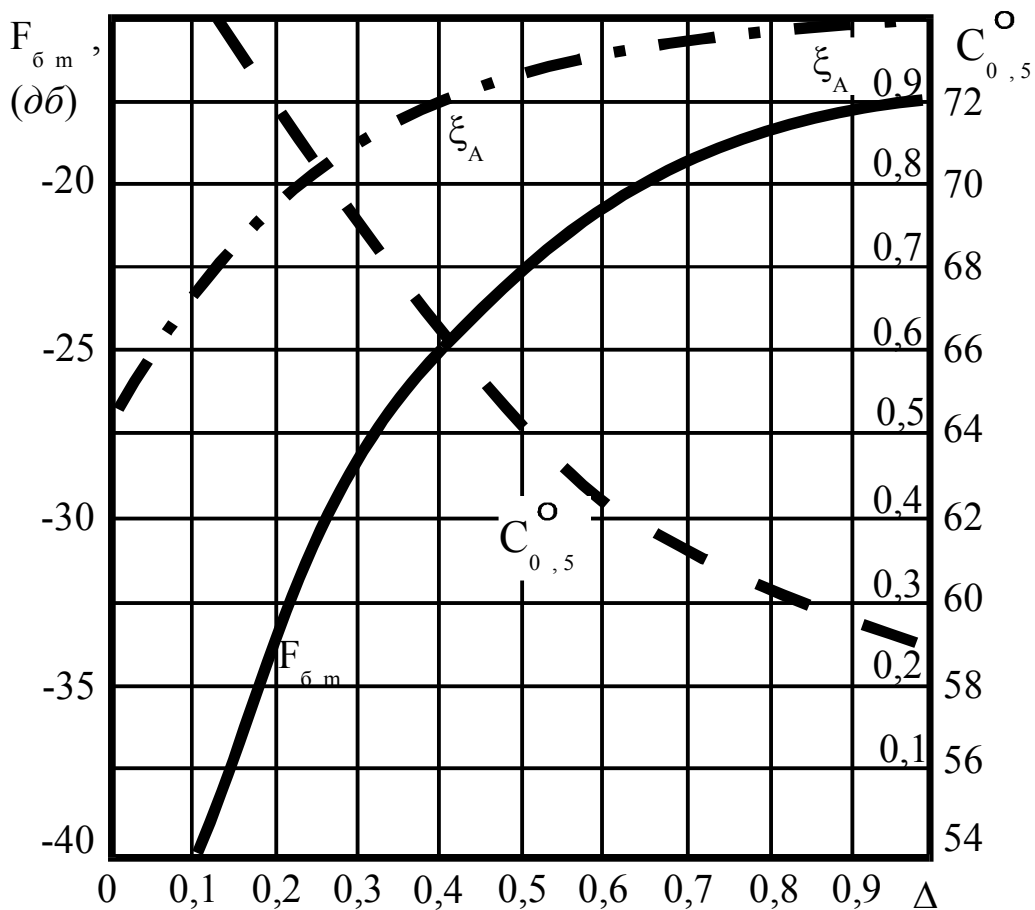


Рис. 28

Основные геометрические соотношения в ФАР приведены на рис. 29.

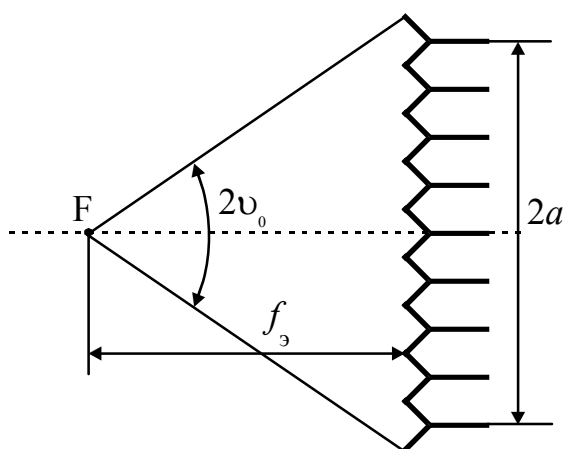


Рис. 29

Для антенн отражательного (зеркального) типа отношение $f_3 / 2a$ выбирается исходя из максимума коэффициента эффективности g_A . Поскольку чаще всего в качестве облучателя используется рупорная антенна, то можно предложить использовать графики, представленные на рис. 30. Выбрав, например, аппроксимацию ДН облучателя вида $F_{обл}(\psi) = \cos \psi$, по соответству-

ющей кривой получим (при $p = 2f_3, R_0 = a$):

$$\frac{a}{2f_3} = 0,62. \quad (95)$$

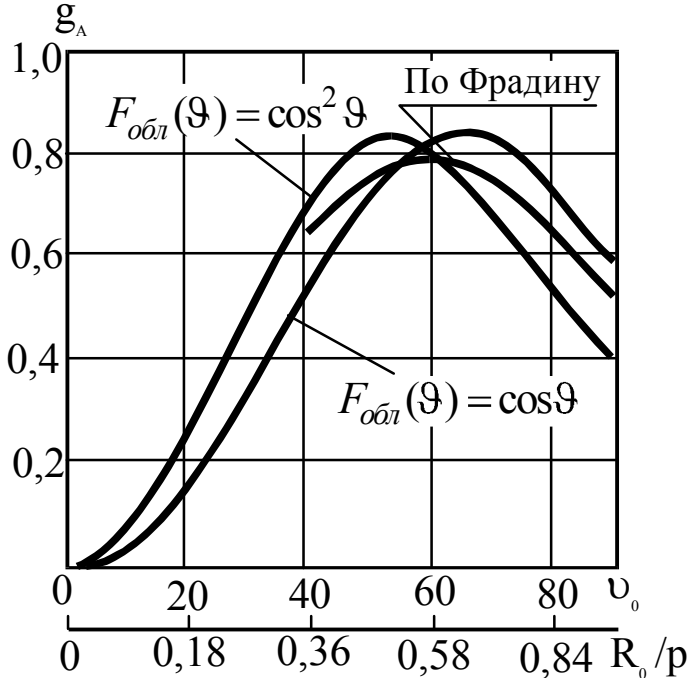


Рис. 30

Следовательно, $f_3 = \frac{a}{1,24}$.

Тогда из (94)

$$2\nu_0 = 2 \operatorname{arctg} a/f_3.$$

2. Выбор формы элемента и определение его размеров

Для обеспечения оптимального использования раскрыва ФАР желательно плотное заполнение элементами. Кроме того, для получения минимального числа элементов ФАР, площадь излучающего элемента должна быть как можно больше.

Этим условиям удовлетворяют два вида расположения излучателей – в углах прямоугольной и треугольной сетки, что соответствует двум типам эквивалентных излучателей – с квадратным и шестиугольным раскрывом. Расстояние между элементами определяется из условия единственности главного максимума при отклонении главного лепестка на величину $\theta_{СК}$.

В случае размещения элементов в узлах квадратной сетки (рис. 31) это условие выглядит следующим образом:

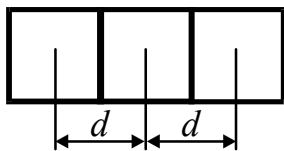


Рис. 31

$$\frac{d}{\lambda} \leq \frac{1}{1 + \sin \theta_{СК}}. \quad (96)$$

На основании данного соотношения выбирается расстояние между элементами d .

Размер эквивалентного элемента (квадрата) можно взять равным d , а площадь элемента определяется выражением:

$$S_3^{np} = d^2. \quad (97)$$

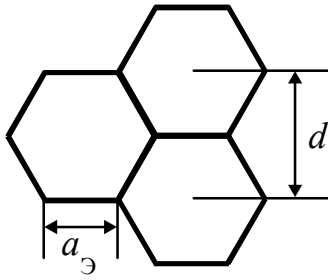


Рис. 32

Если же эквивалентные элементы являются шестиугольниками (рис. 32), то условие единственности главного максимума имеет вид:

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{2}{\sqrt{3}(1 + \sin \theta_{ск})}. \quad (98)$$

Длина стороны такого элемента $a_э = d / 1,5$. Площадь эквивалентного излучателя в треугольной сетке вычисляется следующим образом:

$$S_э^{тр} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot a_э^2 = \frac{\sqrt{3}}{2} d^2. \quad (99)$$

3. Определение количества элементов

Количество элементов в ФАР рассчитывается по формуле:

$$N_{эл} = \frac{S_{фар}}{S_{эл}}. \quad (100)$$

При использовании эквивалентных квадратных элементов их количество вычисляется по выражению:

$$N_{эл}^{кр} = \frac{\pi a^2}{d^2}. \quad (101)$$

В случае применения треугольной сетки необходимое количество элементов:

$$N_{эл}^{тр} = \frac{2\pi a^2}{3\sqrt{3}a_э^2}. \quad (102)$$

Таким образом, использование треугольной сетки и эквивалентных шестиугольных излучателей обеспечивает выигрыш на 15 %. Однако они неудобны в конструктивном отношении. Кроме того, в этом случае в ФАР отсутствует возможность строчно-столбцевого фазирования. Поэтому обычно выбирается квадратная сетка расположения элементов.

4. Определение необходимого дискрета фазы коммутационного фазовращателя

Максимально необходимое изменение фазы, определяемое размерами сектора сканирования, рассчитывается по формуле:

$$\Delta\varphi_{\max} = \frac{2\pi}{k \sin \theta_{\text{СК}}}, \quad (103)$$

где $k=2\pi/\lambda$ – волновое число.

Коммутационная ФАР предполагает дискретный способ управления фазой (рис. 33). При этом изменение фазы происходит скачком с дискретом

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{M}, \quad (104)$$

где $M = 2^v$, $v=1, 2, 3, \dots$. Число v называется разрядностью фазовращателя.

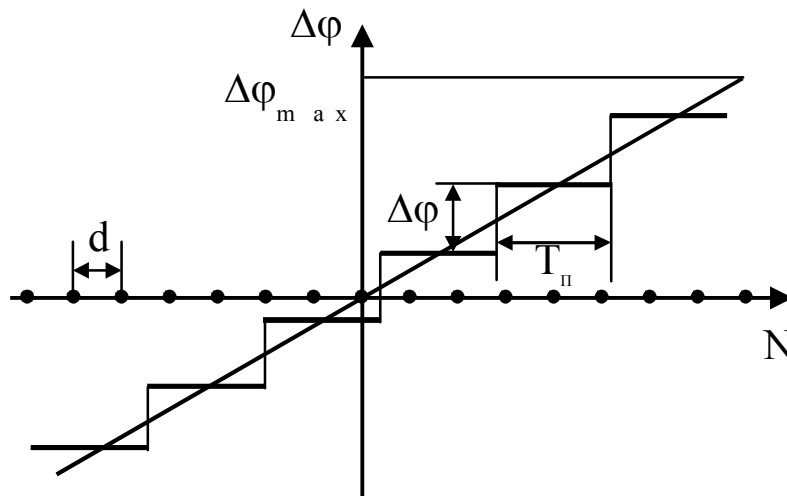


Рис. 33

При дискретном способе управления фазой необходимое фазовое распределение устанавливается с ошибкой, что приводит к уменьшению максимального КНД ФАР и увеличению уровня коммутационных боковых лепестков (наибольшую величину имеет лепесток с номером $m-1$). Основные значения этих изменений при различных $\Delta\varphi$ приведены в табл. 14.

Таблица 14

$\Delta\varphi$	π	$\pi/2$	$\pi/4$	$\pi/8$
D/D_0 раз ($\partial\delta$)	0,405 (-3,92)	0,811 (-0,91)	0,95 (-0,22)	0,987 (-0,05)
$F_{\delta m-1}$ раз ($\partial\delta$)	-	0,333 (-9,54)	0,143 (-16,9)	0,067 (-23,5)

Очевидно, что с уменьшением дискрета фазы ошибки уменьшаются, однако при этом с увеличением разрядности фазовращателей усложняется схема управления фазовым распределением. Как правило, выбирают фазовращатели с $v=3-4$.

При дискретном фазировании на раскрыве ФАР образуются синфазные уча-

стки длиной $T_{\Pi} = \Delta\varphi_{\max}/\Delta\varphi$. На каждом таком участке находится $n_T = T_{\Pi}/d$ излучателей, имеющих одинаковую фазу. Все вышесказанное справедливо для границы сектора сканирования. При других положениях луча величины T_{Π} и n_T соответственно изменяются.

Кроме того, необходимо помнить, что в ФАР обычно применяют фазовращатели с изменением фазы до 2π . При этом для управления фазовым распределением в решетке используют схемы со "сбросом" фазы на величину, кратную 2π .

5. Расчет потерь усиления и максимального уровня паразитных лепестков

Коэффициент усиления коммутационной ФАР значительно снижается по сравнению с КУ, например, синфазной зеркальной антенны таких же габаритов.

Для плоской ФАР на краю сектора сканирования потери усиления

$$\Delta G = \Delta G_1 + \Delta G_2 + \Delta G_3, \quad [\text{дБ}], \quad (105)$$

где $\Delta G_1 = 10 \lg \left[\frac{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}}{\frac{\Delta\varphi}{2}} \right]$ – снижение коэффициента усиления, обусловленное

ступенчатым фазовым распределением с дискретом $\Delta\varphi$;

$\Delta G_2 = 10 \lg \cos \theta_{ск}$ – снижение коэффициента усиления, обусловленное отклонением главного максимума от нормали;

$\Delta G_3 = 1 - 1,5 \text{ дБ}$ – потери в фазовращателях.

Уровень n -1-го паразитного лепестка можно рассчитать по формуле:

$$F_{n-1} = 10 \lg \left(\frac{\frac{\Delta\varphi}{2}}{-\pi n + \frac{\Delta\varphi}{2}} \right)^2, \quad [\text{дБ}]. \quad (106)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Электродинамика и техника СВЧ. М: Воениздат, 1985. Ч.2: Техника сверхвысоких частот.
2. Марков Л.Н. и др. Антенные системы радиоэлектронной техники. М: Воениздат, 1993.
3. Шифрин Я.С. Антенны: Учеб. пособие. Харьков: ВИРТА ПВО, 1976.
4. Ловеров В.Н., Ямайкин В.Е. и др. Основы проектирования антенных устройств СВЧ / Под ред. А. В. Рунова. Минск: МВИЗРУ ПВО, 1970. Ч.1.
5. Ямайкин В.Е., Ковалев В.Н. и др. Основы проектирования антенных устройств СВЧ / Под ред. А. В. Рунова. Минск: МВИЗРУ ПВО, 1972. Ч.2.
6. Неледва В.А. Расчет антенных систем. Киев: КВИРТУ, 1976.
7. Долбик А. И. Устройства СВЧ и антенны: Учеб. пособие. СПб: ФВУ ПВО, 2002. Ч.1: Основы теории антенн и элементы антенных систем.
8. Долбик А. И. Устройства СВЧ и антенны: Учеб. пособие. СПб: ФВУ ПВО, 2004. Ч.2: Антенные системы РЭС РТВ.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1. Исследование элементов СВЧ трактов РЭС	5
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2. Расчет радиотехнических параметров приемных антенн	9
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3. Влияние волновых размеров и АФР на множитель линейной системы излучателей	13
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4. Многовибраторные антенны. Расчет и анализ их основных параметров	16
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5. Волноводно-щелевая антенна. Расчет и анализ ее основных параметров	19
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6. Расчет и анализ основных характеристик рупорных и линзовых антенн	22
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7. Расчет и оценка основных характеристик и параметров зеркальных антенн	26
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 8. Расчет основных характеристик антенных решеток	30
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 9. Оценка характеристик антенных систем при их повреждении	32
ПРИЛОЖЕНИЯ	36
Приложение 1. Методы измерения основных радиотехнических характеристик и параметров приемных антенн	36
Приложение 2. Методика решения задач на расчет множителя линейной системы излучателей	41
Приложение 3. Общая методика расчета элементов конструкции директорной антенны	48
Приложение 4. Методика определения основных радиотехнических характеристик и параметров директорной антенны	50
Приложение 5. Методика расчета волноводно-щелевой антенны	51
Приложение 6. Стандарты для прямоугольных волноводов	52
Приложение 7. Методика расчета зеркальных антенн различных типов ..	53
Приложение 8. Методика расчета фазированной антенной решетки отражательного типа	65
ЛИТЕРАТУРА	71