

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт радиоэлектроники и информационной безопасности

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине

«УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ»

для студентов очной и заочной форм обучения
направлений

11.03.01 «Радиотехника»,

11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Часть 3

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АПЕРТУРНЫХ АНТЕНН И
АНТЕННЫХ РЕШЕТОК**

Севастополь
2017

Рецензент: канд. техн. наук, доцент **А.А. Щекатурин**

Составители: Головин В.В., Тыщук Ю.Н.

Лабораторный практикум по дисциплине «**Устройства СВЧ и антенны**». Исследование характеристик апертурных антенн и антенных решеток: методические рекомендации для студентов очной и заочной форм обучения направления 11.03.01 «Радиотехника» и специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» / СевГУ; сост. В. В. Головин, Ю. Н. Тыщук. — Севастополь: Изд-во СевГУ, 2017. — Ч.3. — 51 с.

Цель методических указаний - оказание помощи студентам дневной и заочной форм обучения в подготовке и выполнении лабораторного практикума по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны», а также в получении ими теоретических знаний и приобретении практических навыков исследования апертурных антенн и антенных решеток.

УДК 621.396.62

Методические рекомендации утверждены на заседании кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» от 26 января 2017 года, протокол № 7.

Методические рекомендации рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании методической комиссии Института радиоэлектроники и информационной безопасности 1 февраля 2017 года, протокол № 7.

Ответственный за выпуск:

д. т. н., профессор, заведующий кафедрой
«Радиоэлектроника и телекоммуникации» **Афонин И. Л.**

Издательский номер 1/17

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Лабораторная работа № 1. Исследование внешних характеристик рупорных антенн.....	6
2. Лабораторная работа № 2. Исследование характеристик волноводно- щелевых антенн.....	18
3. Лабораторная работа № 3. Исследование внешних характеристик параболических антенн.....	30
Библиографический список.....	47
Приложение А. Образец оформления титульного листа отчета по лабораторной работе.....	48
Приложение Б. Пример написания программы для расчета диаграмм направленности параболической антенны в математическом пакете <i>Mathcad 7.0</i>	49

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы выполняются бригадами из 2 — 3 студентов.

Перед выполнением лабораторной работы **студенты обязаны:**

- изучить описание предстоящей лабораторной работы;
- изучить методику предстоящих измерений и расчетов;
- выполнить предварительные расчеты, оформить их в соответствии с требованиями кафедры;
- ознакомиться с правилами работы с измерительными приборами, входящими в измерительную установку;
- подготовиться к ответам на контрольные вопросы, относящиеся к данной лабораторной работе.

Бригада, допущенная к работе, готовит лабораторную установку в соответствии с методическими указаниями и до выполнения измерений предъявляет установку для проверки преподавателю.

При выполнении очередного опыта рекомендуется сначала произвести измерения без записей, чтобы убедиться в работоспособности лабораторной установки и выявить общий характер исследуемой зависимости. При этом следует отметить линейные и нелинейные участки зависимости, что позволит правильно выбрать интервал между отсчетами независимой переменной величины (частоты, напряжения и т.п.), пределы ее изменения, а также число отсчетов, достаточных для выявления особенностей исследуемой зависимости. Затем данный опыт нужно повторить с фиксацией результатов эксперимента.

После завершения работы преподаватель просматривает и подписывает протокол выполнения работы, на основании которого студенты оформляют отчеты.

Защита отчета по выполненной лабораторной работе производится каждым студентом индивидуально на очередном лабораторном занятии. В процессе защиты проверяются: правильность оформления отчета, знание студентами методики проведения экспериментов и умение анализировать характер полученных зависимостей и обосновывать выводы к работе.

Отчет оформляется в соответствии с требованиями кафедры к оформлению текстовых документов [1].

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- постановку задач исследования;
- структурную схему лабораторной установки;
- исходные данные;
- результаты теоретических исследований;
- результаты экспериментов и расчетов;
- выводы.

Образец оформления титульного листа приведен в Приложении А.

При постановке задач исследования необходимо сформулировать цель

лабораторной работы и краткое содержание теоретических и экспериментальных исследований, которые необходимо выполнить в ходе лабораторной работы.

Исходные данные выбираются каждым студентом в соответствии с предпоследней (M) и последней (N) цифрами номера зачетной книжки.

Теоретические исследования выполняются студентом при подготовке к лабораторной работе. Для получения допуска к работе студент должен предъявить отчет, содержащий подготовленный бланк протокола измерений, и ответить на один-два вопроса (по выбору преподавателя) из числа контрольных вопросов для подготовки к выполнению работы.

Выводы должны носить конкретный характер по каждой из поставленных задач. Не следует подменять выводы перечислением выполненных измерений и наблюдений. Необходимо пояснить особенности исследованных зависимостей, оценить соответствие расчетных и экспериментальных данных, а в случае их расхождения — высказать предположения о возможных причинах, вызвавших такое расхождение.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ РУПОРНЫХ АНТЕНН

1.1. Цель работы

Изучить принцип действия рупорных антенн и методику расчета их диаграмм направленности и коэффициента направленного действия с учетом ограничений для геометрических параметров антенн. Освоить методику измерения внешних характеристик рупорных антенн.

1.2. Описание измерительной установки

Измерительная установка (рис. 1.1) включает: исследуемую антенну 1, вспомогательную антенну 2, эталонную антенну 3, опорно-поворотное устройство для исследуемой антенны 4, волноводный коммутатор 5, опорно-поворотное устройство для вспомогательной антенны 6, СВЧ генератор 7, детекторную секцию 8, селективный микровольтметр 9.

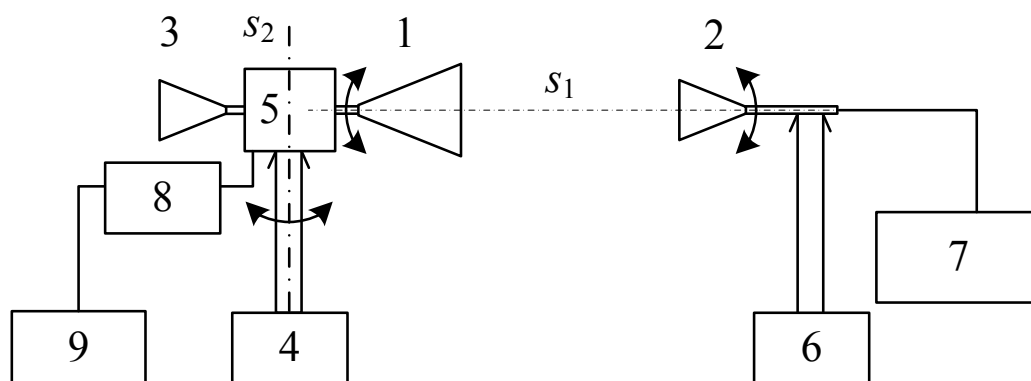


Рисунок 1.1 — Структурная схема измерительной установки

Расстояние между исследуемой и вспомогательной антеннами выбирается из условия размещения приемной антенны в дальней зоне передающей антенны. Высота подвеса антенн выбирается из условия минимального влияния волны, отраженной от подстилающей поверхности.

Опорно-поворотное устройство 4 позволяет вращать исследуемую антенну вокруг осей s_1 и s_2 . Однокоординатное опорно-поворотное устройство 6 позволяет вращать вспомогательную антенну вокруг оси s_1 .

1.3. Исходные данные

Исходными данными для теоретических исследований являются: номера двух рупорных антенн, габаритные размеры апертур $a_p \times b_p$ и длина граней L рупоров, рабочие частоты f_1 и f_2 , тип возбуждающего волновода (табл. 1.1, 1.2).

Таблица 1.1 — Исходные данные для выполнения теоретических и экспериментальных исследований

M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
№ рупора	1	3	6	7	8	9	10	1	3	6
f_1 , ГГц	9,4	9,2	9,5	9,6	9,3	9,4	9,8	9,2	9,6	9,9
N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
№ рупора	2	4	5	2	4	5	2	4	5	2
f_2 , ГГц	10,1	10,5	10,8	10,3	10,1	10,4	10,7	10,3	10,2	10,5

Таблица 1.2 — Геометрические размеры рупорных антенн

№ рупора	a_p , мм	b_p , мм	L_H , мм	L_E , мм	Тип волновода
1	135	90	157	152	R100
2	145	115	240	242	R100
3	100	80	95	97	R100
4	23	208	217	194	R100
5	80	60	92	94	R100
6	42	56	93	90	R84
7	50	80	144	140	R84
8	46	68	119	117	R84
9	23	55	58	56	R84
10	159	49	189	199	R84

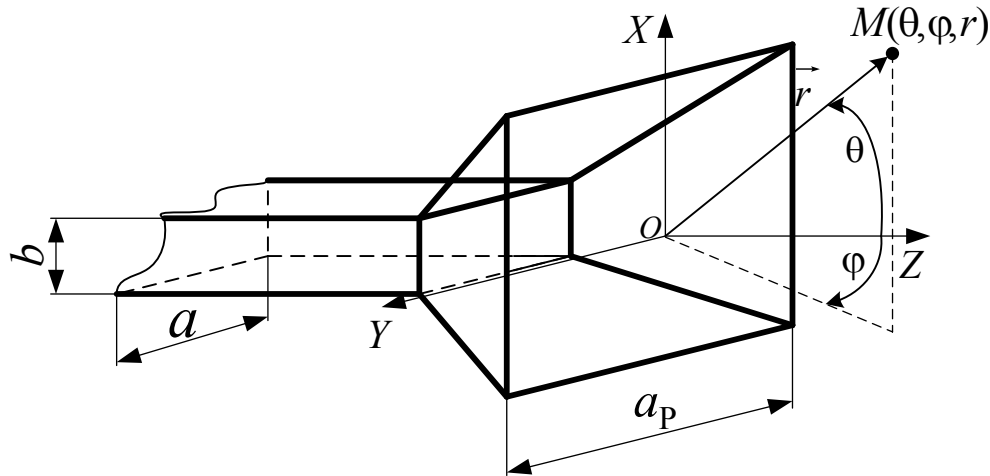
Примечание. Типы возбуждающих волноводов:

- R84: размер поперечного сечения волновода 28,50×12,62 мм;
- R100: размер поперечного сечения волновода 22,66×10,16 мм.

1.4. Методика расчета диаграмм направленности рупорных антенн

Обобщенная модель рупорной антенны показана на рис. 1.2.

а)



б)

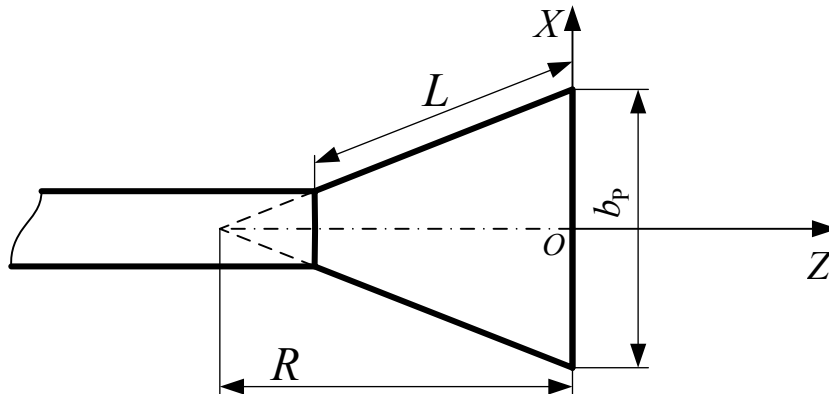


Рисунок 1.2 — Модель рупорной антенны в декартовой системе координат (а) и проекция антенны в плоскости XOZ (б)

На основе модели, показанной на рис. 1.2., можно рассмотреть следующие варианты апертурных излучателей:

- E -секториальный рупор, при $a_p = a$ и $b_p > b$;
- H -секториальный рупор, при $a_p > a$ и $b_p = b$;
- пирамидальный остроконечный рупор, при $a_p > a$ и $b_p > b$.

Излучающей поверхностью рупора является поверхность его раскрыва. Особое внимание уделяется амплитудно-фазовому распределению поля в апертуре рупорной антенны. Амплитудное распределение поля на раскрыве совпадает с распределением поля в поперечном сечении волновода для основного типа волны. В плоскости E наблюдается равномерное амплитудное распределение поля, в плоскости H — косинусоидальное

$$E_y = E_0 \cos\left(\frac{\pi y}{a_p}\right).$$

Фронт волны в процессе ее движения в рупоре преобразуется из плоского в цилиндрический (в секториальных рупорах) или в сферический (в пирамидальных рупорах). Фазовое распределение имеет квадратичный характер в плоскости, в которой производится раскрыв рупора. Максимальная *фазовая ошибка* (максимальный сдвиг по фазе по отношению к центру раскрыва) определяется соотношением

$$\text{— в } E\text{-плоскости:} \quad \Delta\psi_{\max}^E \approx \frac{\pi}{4} \frac{b_p^2}{\lambda R}, \quad (1.1)$$

$$\text{— в } H\text{-плоскости:} \quad \Delta\psi_{\max}^H \approx \frac{\pi}{4} \frac{a_p^2}{\lambda R}, \quad (1.2)$$

где R — длина рупора (см. рис. 1.2).

Максимальная фазовая ошибка, достигаемая в углах пирамидального рупора определяется соотношением

$$\Delta\psi_{\max} \approx \frac{\pi}{4} \left(\frac{a_p^2}{\lambda R} + \frac{b_p^2}{\lambda R} \right).$$

Если максимальные фазовые ошибки в раскрыве рупора не превышают допустимых

$$\Delta\psi_{\max}^E \leq \frac{\pi}{2}, \quad \Delta\psi_{\max}^H \leq \frac{3\pi}{4},$$

то коэффициент направленного действия (КНД) рупорной антенны при заданной длине будет максимальным. Рупор, в раскрыве которого квадратичные фазовые ошибки не превышают допустимых значений, называется «оптимальными». Размеры апертуры рупора связаны с его длиной следующими соотношениями:

$$R_E \geq \frac{b_p^2}{2\lambda}, \quad (1.3)$$

$$R_H \geq \frac{a_p^2}{3\lambda}. \quad (1.4)$$

Нормированные диаграммы направленности (ДН) рупорной антенны в предложении синфазного раскрыва (при квадратичных фазовых ошибках, не превышающих допустимые значения) можно рассчитать по формулам:

$$\text{— в } E\text{-плоскости:} \quad f^E(\theta) = \left| \frac{1 + \cos \theta}{2} \frac{\sin \left(\frac{\pi b_p}{\lambda} \sin \theta \right)}{\frac{\pi b_p}{\lambda} \sin \theta} \right|; \quad (1.5)$$

— в H -плоскости:

$$f^H(\varphi) = \left| \frac{1 + \cos \varphi}{2} \frac{\cos\left(\frac{\pi a_p}{\lambda} \sin \varphi\right)}{1 - \left(\frac{2a_p}{\lambda} \sin \varphi\right)^2} \right|, \quad (1.6)$$

Ширина главного луча диаграммы направленности рупорных антенн в E - и H -плоскостях ($2\Delta\theta_{0,5}^E$ и $2\Delta\theta_{0,5}^H$) определяется по уровню половинной мощности по формулам:

H -секториальный рупор: $2\Delta\theta_{0,5}^E = 0,88 \frac{\lambda}{b} \text{ [рад]};$ (1.7)

$$2\Delta\theta_{0,5}^H = 1,4 \frac{\lambda}{a_p} \text{ [рад]}; \quad (1.8)$$

E -секториальный рупор: $2\Delta\theta_{0,5}^E = 0,93 \frac{\lambda}{b_p} \text{ [рад]};$ (1.9)

$$2\Delta\theta_{0,5}^H = 1,18 \frac{\lambda}{a} \text{ [рад]}; \quad (1.10)$$

пирамидальный рупор: $2\Delta\theta_{0,5}^E = 0,93 \frac{\lambda}{b_p} \text{ [рад]};$ (1.11)

$$2\Delta\theta_{0,5}^H = 1,4 \frac{\lambda}{a_p} \text{ [рад]}. \quad (1.12)$$

Коэффициент направленного действия H -секториального рупора D_H определяется по формуле [3]

$$D_H = \frac{4\pi b_p R_H}{\lambda a_p} \{ [C(u) + C(v)]^2 + [S(u) + S(v)]^2 \}, \quad (1.13)$$

где $C(x) = \int_0^x \cos\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt$; $S(x) = \int_0^x \sin\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt$ — интегралы Френеля;

$$u = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{a_p}{\sqrt{\lambda R_H}} - \frac{\sqrt{\lambda R_H}}{a_p} \right); \quad v = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{a_p}{\sqrt{\lambda R_H}} + \frac{\sqrt{\lambda R_H}}{a_p} \right).$$

Коэффициент направленного действия E -секториального рупора D_E определяется по формуле [3]

$$D_E = \frac{64 a_p R_E}{\pi \lambda b_p} \left\{ C^2\left(\frac{b_p}{\sqrt{2\lambda R_E}}\right) + S^2\left(\frac{b_p}{\sqrt{2\lambda R_E}}\right) \right\}. \quad (1.14)$$

Коэффициент направленного действия пирамидального рупора D с учетом (1.13, 1.14) определяется по следующей формуле [3]

$$D = \frac{\pi \lambda^2}{32 a_p b_p} D_E D_H. \quad (1.15)$$

Коэффициент направленного действия (КНД) **оптимальной** рупорной

антенны вычисляется по формуле:

$$D = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \nu, \quad (1.16)$$

где $S = a_p b_p$ — геометрическая площадь раскрыва; ν — коэффициент использования поверхности, определяемый амплитудным ν_a и фазовым ν_ϕ распределением поля в раскрыве антенны: $\nu = \nu_a \cdot \nu_\phi$.

Для **оптимальных** секториальных рупоров $\nu_a = 0,81$ учитывает косинусоидальный характер амплитудного распределения поля в H -плоскости; $\nu_\phi = 0,8$ — несинфазность раскрыва в одной из плоскостей при условии $\Delta\psi_{\max} \leq \Delta\psi_{\text{доп}}$.

Поэтому для **секториальных** рупорных антенн $\nu \approx 0,81 \cdot 0,8 \approx 0,64$.

Для **оптимальных** пирамидальных рупоров при тех же условиях $\nu = \nu_a \nu_\phi^2 \approx 0,52$ (учтена несинфазность раскрыва в обеих плоскостях).

1.5. Порядок выполнения работы

1.5.1. Теоретические исследования

а) Рассчитать длины рупора R_H и R_E (см. рис. 1.2) по формулам:

$$R_H = \sqrt{\frac{L^2 a_p^2}{(a_p - a)^2} - \frac{a_p^2}{4}}; \quad R_E = \sqrt{\frac{L^2 b_p^2}{(b_p - b)^2} - \frac{b_p^2}{4}};$$

— для H -секториального рупора рассчитывается только R_H ;

— для E -секториального рупора рассчитывается только R_E ;

— для пирамидального рупора рассчитываются R_H и R_E .

б) По формулам (1.1) и (1.2) рассчитать максимальные квадратичные фазовые ошибки в апертурах двух рупорных антенн.

в) По формулам (1.3) и (1.4) рассчитать оптимальные длины исследуемых рупорных антенн.

г) По формулам (1.5) и (1.6) построить в декартовой системе координат нормированные диаграммы направленности исследуемых рупорных антенн в E - и H -плоскостях.

д) По формулам (1.7) — (1.12) рассчитать ширину главного лепестка диаграмм направленности рупорных антенн в E - и H -плоскостях.

е) По диаграммам направленности рупорных антенн определить максимальный уровень побочного излучения.

ж) По формулам (1.13) — (1.15) рассчитать коэффициент направленного действия для исследуемых рупорных антенн.

1.5.2. Экспериментальные исследования

а) Установить на генераторе частоту, заданную для первой исследуемой рупорной антенны. Настройка генератора (Г4-109) осуществляется следующим образом:

- ручкой «**Поддиапазоны**» установить нужный диапазон частот;
- при помощи ручки «**Частотомер**» установить требуемую по заданию частоту СВЧ колебаний;
- повернуть ручку «**Чувствительность**» по часовой стрелке до упора;
- добиться заметного отклонения стрелки индикатора настройки, вращая вправо-влево ручку «**Установка частоты**» нужного поддиапазона;
- плавно поворачивая ручку «**Установка частоты**», добиться максимального отклонения стрелки индикатора настройки.

Внимание! Выполняя настройку генератора, нельзя допускать «зашкала» индикатора! Для этого необходимо ручкой «Чувствительность» подбирать подходящую чувствительность прибора.

б) Переключить волноводный коммутатор в положение «к исследуемой антенне» (рис. 1.3).

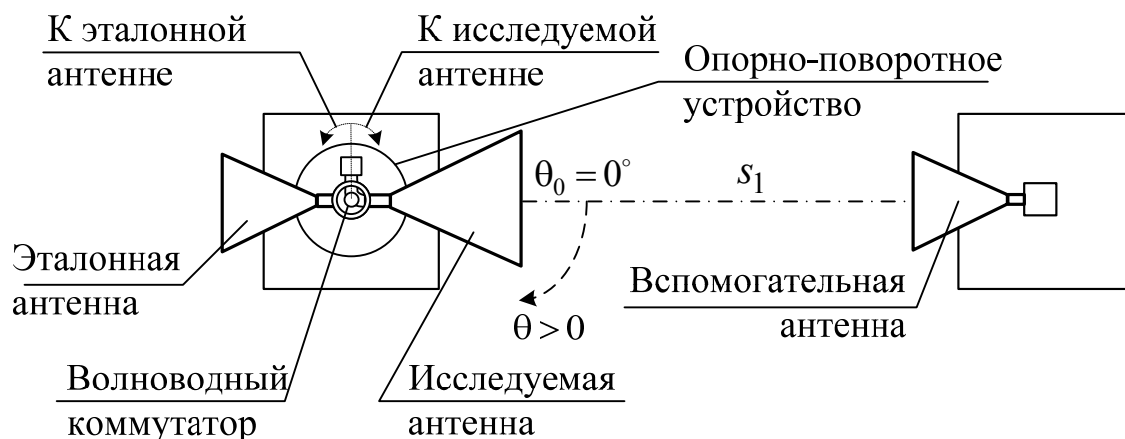


Рисунок 1.3 — Схема измерительной установки. Вид сверху

в) Установить первую исследуемую антенну (см. табл. 1.1) на опорно-поворотное устройство.

г) Подготовить антенны для измерения ДН в H -плоскости. Для этого следует повернуть исследуемую и вспомогательную рупорные антенны вокруг оси s_1 (см. рис. 1.3) так, чтобы у расположенных на входах антенн волноводов широкая стенка располагалась параллельно горизонтальной плоскости.

д) Повернуть исследуемую антенну в горизонтальной плоскости в направлении на вспомогательную антенну так, чтобы получить максимальное показание на микровольтметре. При этом максимальное показание микровольтметра принять за $f(\theta_0)$, а зафиксированное направление принять за $\theta_0 = 0^\circ$.

е) Провести измерения ДН рупорной антенны в H -плоскости:

— из положения, соответствующего θ_0 , нужно исследуемую антенну поворачивать вокруг вертикальной оси однокоординатного опорно-поворотного устройства **по часовой стрелке**, пока показания микровольтметра не составят $f(\theta_1) = 0,5f(\theta_0)$ (рис. 1.4); записать полученные данные (значение угла θ_1 и показания микровольтметра как величину $f(\theta_1)$);

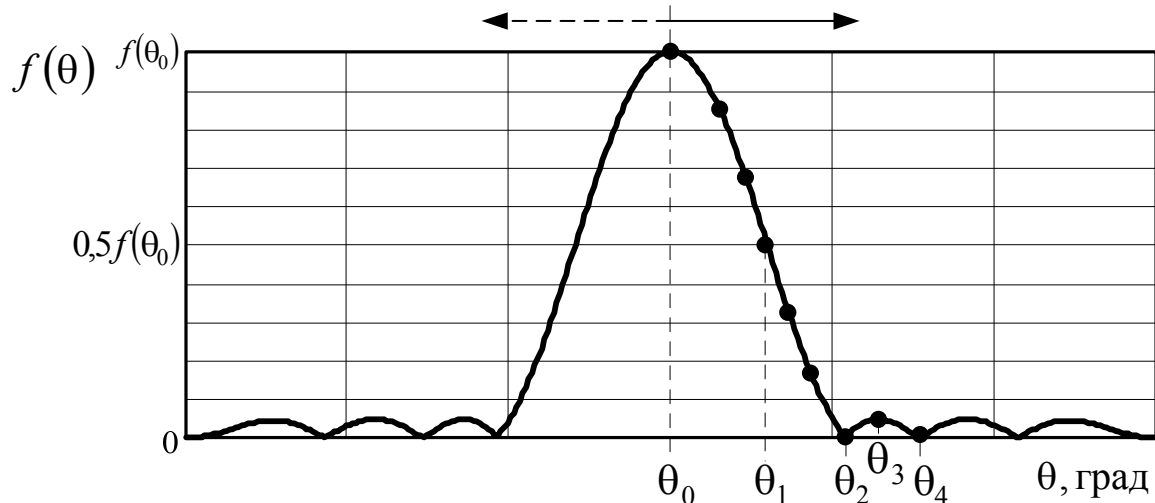


Рисунок 1.4 — Методика измерения диаграммы направленности рупорной антенны

— определить направление первого минимума в диаграмме направленности θ_2 (рис. 1.4) и значение $f(\theta_2)$;

— на интервалах углов $\theta \in (\theta_0, \theta_1)$ и $\theta \in (\theta_1, \theta_2)$ **произвести измерение ДН антенны в двух дополнительных точках на каждом из интервалов**;

— повернуть антенну на угол $\theta > \theta_2$ и определить направления, соответствующие первому боковому максимуму $f(\theta_3)$ и следующему минимуму ДН $f(\theta_4)$;

— повернуть антенну в исходное положение, соответствующее углу θ_0 ;

— повторить аналогичный порядок измерений при вращении антенны **против часовой стрелки**.

ж) Провести измерения ДН рупорной антенны в E -плоскости. Для этого, согласно рис. 1.3, повернуть исследуемую и вспомогательную антенны на 90° вокруг оси s_1 и повторить измерения ДН аналогично п. е).

з) Переключить волноводный коммутатор в положение «к эталонной антенне» (см. рис. 1.3).

и) Произвести юстировку эталонной и **вспомогательной** антенн, выполнив операции аналогично п. д). Определить показания микровольтметра $f_{\Sigma}(\theta_0)$.

к) Установить на генераторе вторую частоту, заданную для второй

исследуемой рупорной антенны.

л) Переключить волноводный коммутатор в положение «к исследуемой антенне» (см. рис. 1.3).

м) Установить вторую исследуемую антенну (см. табл. 1.1) на опорно-поворотное устройство.

н) Выполнить операции по пп. г) — и).

1.5.3. Обработка результатов измерений

а) Для измерений ДН первой исследуемой антенны, выполненных в H -плоскости:

— пересчитать значения всех углов относительно значения угла θ_0 (см. табл. 1.3, две верхние строки);

— пронормировать и перевести в децибелы измеренные значения показаний микровольтметра по формуле

$$F(\theta) = 10 \lg \left(\frac{f(\theta)}{f(\theta_0)} \right);$$

— все результаты пересчетов занести в таблицу.

б) Для измерений ДН первой исследуемой антенны, выполненных в E -плоскости, заполнить таблицу в порядке, аналогичном пп. а).

Таблица 1.3 — Пример заполнения таблицы с результатами измерений в одной плоскости

	θ_0								
Отсчет, град	80	85	90	95	100	105	110	115	120
θ , град	−40	−35	−30	−25	−20	−15	−10	−5	0
$f(\theta)$	0,1	5	0,1	20	35	50	65	80	100
$F(\theta)$, дБ	−30	−13	−30	−7	−4,6	−3	−1,8	−1	0

	θ_0								
Отсчет, град	120	125	130	135	140	145	150	155	160
θ , град	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$f(\theta)$	100	83	60	50	30	15	0,5	7	0,5
$F(\theta)$, дБ	0	−0,8	−2,2	−3	−5,2	−8,2	−23	−11	−23

в) Для второй исследуемой антенны обработать результаты измерений диаграмм направленности аналогично п. а), б).

г) Для первой исследуемой антенны построить в одной **декартовой системе координат** графики для экспериментально измеренных диаграмм направленности в E - и H -плоскостях в децибелах ($F(\theta)$, дБ). Выполнить аналогичные построения для второй исследуемой антенны.

д) По экспериментальным диаграммам направленности определить для двух антенн ширину главного лепестка $2\Delta\theta_{-3\text{дБ}}^E$ и $2\Delta\theta_{-3\text{дБ}}^H$ и уровни первых

боковых лепестков.

- е) Рассчитать коэффициенты усиления для первой антенны:
- заполнить верхнюю строку табл. 1.4 (результаты измерений в направлении максимального излучения для исследуемой $f(\theta_0)$ и эталонной $f_{\text{э}}(\theta_0)$ антенн);
 - по графику на рис. 1.4 для частоты, на которой проводились измерения, определить значение коэффициента усиления эталонной антенны $G_{\text{э}}, \text{дБ}$; найденное значение записать в табл. 1.4;
 - рассчитать значение коэффициента усиления антенны по формуле:

$$G = G_{\text{э}} + 10 \lg \frac{f(\theta_0)}{f_{\text{э}}(\theta_0)};$$

- полученное значение коэффициента усиления антенны занести в табл. 1.4.
- ж) Рассчитать коэффициенты усиления для второй антенны аналогично п. е).

Таблица 1.4 — Пример заполнения таблицы с результатами расчета коэффициента усиления рупорной антенны для частоты 10 ГГц (антенна 1) и 9 ГГц (антенна 2)

$f(\theta)$	Антенна 1		Антенна 2	
	$f(\theta_0)$	$f_{\text{э}}(\theta_0)$	$f(\theta_0)$	$f_{\text{э}}(\theta_0)$
	100	120	90	105
$G_{\text{э}}, \text{дБ}$	17,2		16	
$G, \text{дБ}$	16,4		15,3	

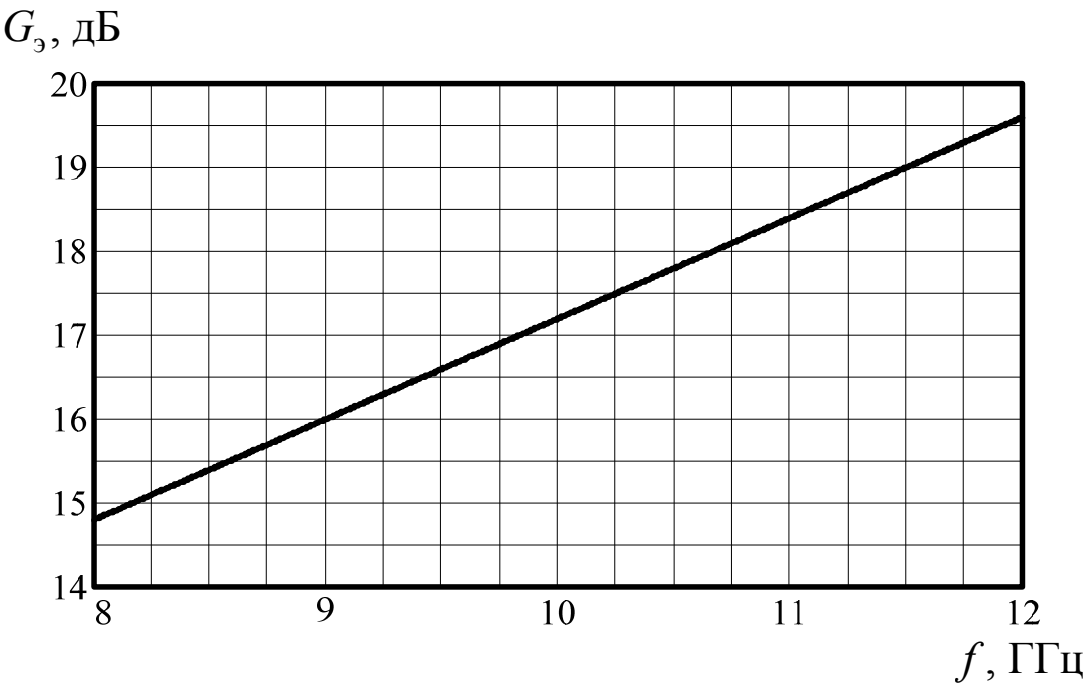


Рисунок 1.4 — Зависимость коэффициента усиления эталонного рупора от частоты

з) Сравнить результаты теоретического и экспериментального исследований.

и) Сделать выводы по работе.

1.6. Контрольные вопросы и задания

1.6.1. Вопросы для допуска к лабораторной работе

а) Опишите состав установки для измерения характеристик излучения рупорной антенны.

б) На примере исследуемой антенны покажите как будет располагаться антенна при измерениях ДН в H - и в E -плоскостях.

в) Что входит в программу экспериментальных измерений характеристик рупорной антенны?

г) Опишите методику измерения диаграммы направленности рупорной антенны.

д) Поясните методику измерения и расчета коэффициента усиления рупорной антенны.

1.6.2. Задания для подготовки к защите лабораторной работы

а) Определить размеры апертуры H -секториального рупора, возбуждаемого прямоугольным волноводом на длине волны $\lambda = 3,2$ см. Длина рупора $R_H = 25$ см. Размеры питающего рупор волновода: $a = 2,3$ см, $b = 1$ см.

б) Определить размеры апертуры остроконечного пирамидального рупора, возбуждаемого на длине волны $\lambda = 2,8$ см. Длина рупора в двух плоскостях одинакова и равна $R_{E,H} = 15$ см. Размеры питающего рупор волновода: $a = 2,3$ см, $b = 1$ см.

в) Эффективная площадь E -секториальной рупорной антенны $S_{эф} = 0,64 S_p = 180$ см². Определить габаритные размеры антенны при работе на длине волны $\lambda = 6$ см, если один из размеров раскрыва рупора $a_p = 5,8$ см.

г) Во сколько раз ширина главного луча ДН пирамидального рупора на уровне 0,5 по мощности в E -плоскости $2\Delta\theta_{0,5}^E$ больше ширины главного луча ДН на том же уровне в H -плоскости $2\Delta\theta_{0,5}^H$, если размеры апертуры рупора связаны соотношением $a_p = 2b_p$.

д) Рассчитать и построить в декартовой системе координат нормированную амплитудную ДН E -секториального рупора в плоскости E , если ширина его раскрыва $b_p = 10$ см, а длина волны $\lambda = 2$ см.

е) Определить размеры раскрыва пирамидального рупора, КНД которого $D = 240$, если ширина главного луча ДН рупора на уровне 0,5 по мощности в главных плоскостях одинакова ($2\Delta\theta_{0,5}^H = 2\Delta\theta_{0,5}^E$), а длина волны $\lambda = 2$ см.

ж) Эффективная площадь H -секториальной рупорной антенны

$S_{\text{эф}}=0,64S=200 \text{ см}^2$. Определить габариты антенны при работе на длине волны $\lambda = 13 \text{ см}$, если один из размеров рупора в раскрыве $b_p = 3,4 \text{ см}$.

з) Определить габариты E -секториального рупора, возбуждаемого на длине волны $\lambda = 9 \text{ см}$ прямоугольным волноводом с размерами поперечного сечения $a=7,2 \text{ см}$ и $b=3,4 \text{ см}$. Длина рупора $R_E = 80 \text{ см}$.

и) Пирамидальный рупор с квадратным раскрывом возбуждается волной H_{10} . В какой из плоскостей (E или H) и во сколько раз ширина луча рупора на уровне 0,5 по мощности буде больше и почему?

к) Во сколько раз изменится коэффициент усиления рупорной антенны, если a_p и b_p увеличатся в 1,5 раза? При этом квадратичные фазовые ошибки в раскрыве рупора не превышают допустимых значений.

л) На длине волны $\lambda = 2,5 \text{ см}$ качественно сравните внешние характеристики (квадратичные фазовые ошибки в раскрыве рупора, ДН, коэффициент усиления) пирамидальных рупорных антенн с $a_p = 10 \text{ см}$ и $b_p = 7 \text{ см}$, отличающихся длиной: $R_{E,H 1} = 13,5 \text{ см}$ и $R_{E,H 2} = 10 \text{ см}$.

м) На длине волны $\lambda = 4 \text{ см}$ качественно сравните внешние характеристики (квадратичные фазовые ошибки в раскрыве рупора, ДН, коэффициент усиления) пирамидальных рупорных антенн с $a_p = 12 \text{ см}$ и $b_p = 12 \text{ см}$, отличающихся длиной: $R_{E,H 1} = 18 \text{ см}$ и $R_{E,H 2} = 10 \text{ см}$.

н) Как измениться диаграмма направленности оптимального пирамидальной рупорной антенны, если размеры раскрыва рупора увеличить в два раза, а длину рупора оставить прежней?

о) Как определить для рупорной антенны положение E - и H -плоскостей?

п) Чем отличаются конструкции H -секториального и E -секториального рупоров?

р) Рассматриваются две оптимальные рупорные антенны: H -секториальный рупор с размерами $a_p \times b$ и пирамидальный рупор с размерами $a_p \times b_p$. Поясните, в чем будет отличие внешних характеристик этих двух антенн.

с) Поясните, исходя из каких соображений и каким образом определяется длина рупорной антенны.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВЫХ АНТЕНН

2.1. Цель работы

Изучить принципы построения волноводно-щелевых антенн. Выполнить теоретические расчеты характеристик излучения в соответствии с индивидуальным заданием. Провести экспериментальное исследование внешних характеристик волноводно-щелевых антенн.

2.2. Описание измерительной установки

Измерительная установка (рис. 2.1) включает: исследуемые резонансную волноводно-щелевую антенну 1 и нерезонансную волноводно-щелевую антенну 2, вспомогательную антенну 3, детекторные секции 4, опорно-поворотное устройство для исследуемой антенны 5, опорно-поворотное устройство для вспомогательной антенны 6, СВЧ генератор 7, селективный микровольтметр 8.

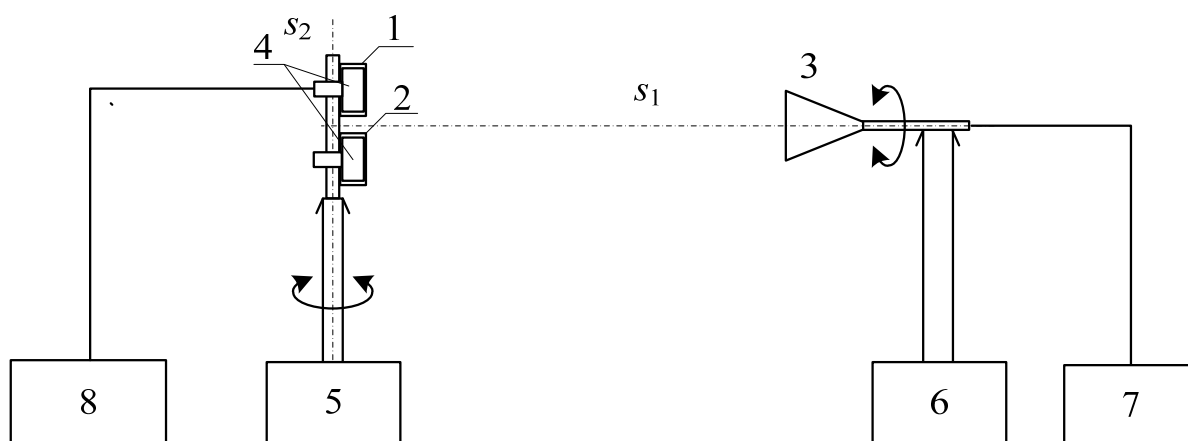


Рисунок 2.1 — Структурная схема измерительной установки

Расстояние между исследуемыми и вспомогательной антеннами выбирается из условия размещения приемной антенны в дальней зоне передающей антенны. Высота подвеса антенн выбирается из условия минимального влияния волны, отраженной от подстилающей поверхности. Опорно-поворотное устройство 5 позволяет вращать исследуемые антенны вокруг оси s_2 . Опорно-поворотное устройство 6 позволяет вращать вспомогательную антенну вокруг оси s_1 .

2.3. Исходные данные

Исходными данными для теоретических исследований являются (табл. 2.1):

— для **резонансной** волноводно-щелевой антенны: поперечное сечение прямоугольного волновода $0,023 \times 0,01$ м; расстояние между центрами соседних щелей $d = 0,02$ м; длина щелевых излучателей $l = 0,015$ м; два варианта количества щелей в решетке — n_1, n_2 ; рабочая частота $f_1 = 9,5$ ГГц;

— для **нерезонансной** волноводно-щелевой антенны: поперечное сечение прямоугольного волновода $0,023 \times 0,01$ м; длина щелевых излучателей $l = 0,015$ м; расстояние между центрами соседних щелей $d = 0,02$ м; количество щелей в решетке $n_3 = 25$; рабочая частота f_2 ; верхняя $f_3 = f_2 + \Delta f$ и нижняя $f_4 = f_2 - \Delta f$ частоты диапазона при $\Delta f = 0,5$ ГГц.

Таблица 2.1 — Исходные данные для выполнения теоретических и экспериментальных исследований

Резонансная волноводно-щелевая антенна											
M_3		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Кол-во щелей	n_1	6	4	7	8	9	6	5	7	9	8
	n_2	12	10	14	18	16	11	15	17	16	13
Нерезонансная волноводно-щелевая антенна											
N_3		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
f_2 , ГГц		9,5	9	8,5	9,5	9	8,5	9,5	9	8,5	9,5

Примечание: M_3 и N_3 — предпоследняя и последняя цифры зачетный книжки, соответственно.

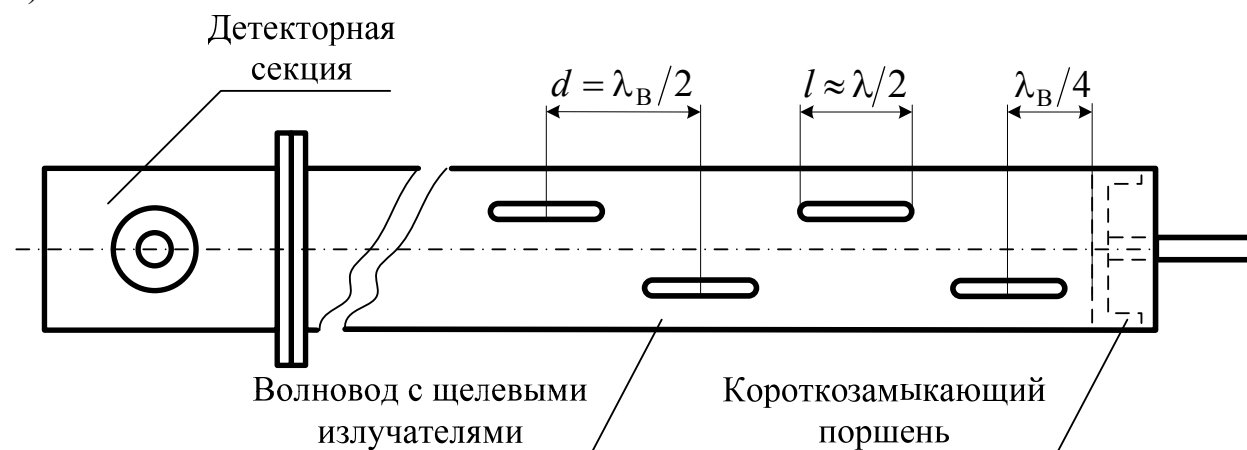
2.4. Методика расчета характеристик волноводно-щелевых антенн

2.4.1. Особенности построения волноводно-щелевых антенн

Обобщенные модели резонансной (РВЩА) и нерезонансной (НВЩА) волноводно-щелевых антенн показаны на рис. 2.2.

Задача об излучении щелевой антенны характеризуется рядом особенностей, отличающих ее от аналогичных задач для других типов СВЧ антенн, где амплитудно-фазовые распределения поля в апертуре мы получали, используя электромагнитное поле внутри антенны. Сложность состоит в том, что закон изменения амплитуд и фаз поля в щели не зависит от внутреннего поля в волноводе, на стенке которого вырезана щель.

а)



б)

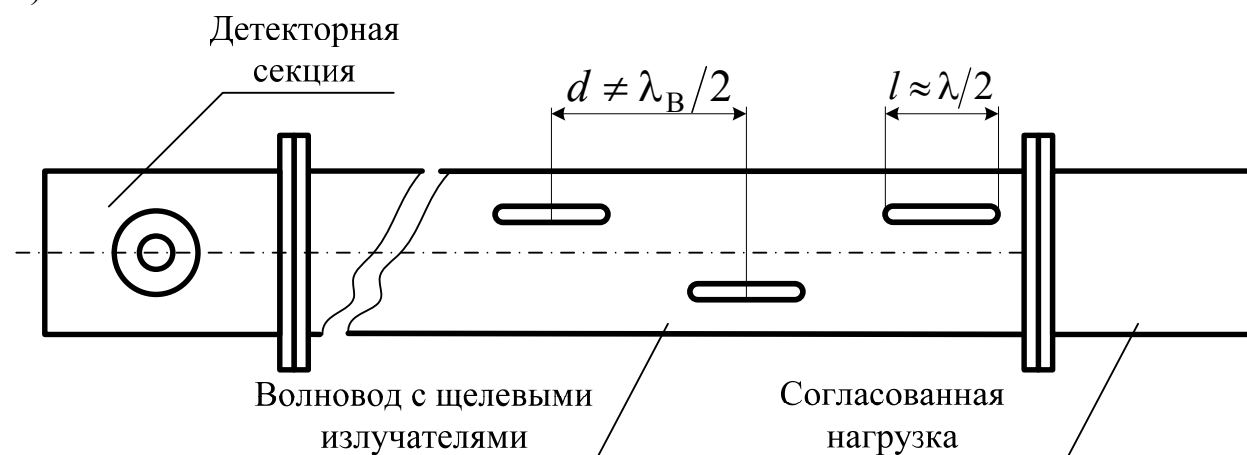


Рисунок 2.2 — Модели резонансной (а) и нерезонансной (б) волноводно-щелевых антенн

У резонансных антенн щели располагаются вдоль волновода на расстояниях $\lambda_B/2$ и вследствие этого возбуждаются синфазно стоячей волной поля в волноводе (рис. 2.2, а), создающей соответственное распределение тока на широкой стенке волновода. Режим стоячей волны обеспечивается установкой на конце волновода перестраиваемого короткозамыкающего поршня.

У нерезонансных антенн щели располагаются вдоль волновода на расстояниях отличных от $\lambda_B/2$ и вследствие этого возбуждаются несинфазно бегущей волной поля в волноводе (рис. 2.2, б), создающей соответственное распределение тока на широкой стенке волновода. Режим бегущей волны обеспечивается согласованием антенны с конечной нагрузкой, для чего в конце волновода ставится поглотитель. Поэтому КПД нерезонансных антенн меньше, чем у резонансных. Нерезонансные антенны являются более широкодиапазонными, чем резонансные. Это положительное качество нерезонансных щелевых антенн обусловлено хорошим согласованием в полосе частот.

4.2.2. Методика расчета характеристик волноводно-щелевых антенн

К исследованию щелевых антенн может быть применен принцип поляризационной двойственности Бабинэ, который значительно облегчает получение требуемых расчетных формул. Этот принцип является вполне точным для идеальной щелевой антенны, т.е. для щели на неограниченной идеально-проводящей бесконечно тонкой плоскости. Однако этим методом можно пользоваться и в большинстве практических случаев.

Содержание принципа двойственности сводится к следующему. Если к идеальной щелевой антенне приложить от какого-либо источника электродвижущую силу частоты f , то векторы электромагнитного поля $\vec{E}_1$ и $\vec{H}_1$ в щели и в окружающем щель пространстве будут иметь такое же направление и являться такими же функциями пространственных координат, какое направление и какими функциями являются соответственно векторы $\vec{E}_2$ и $\vec{H}_2$ ($\vec{E}_1 = \vec{H}_2, \vec{H}_1 = -\vec{E}_2$) электромагнитного поля вибратора в виде идеально проводящей бесконечно тонкой пластинки, находящейся в свободном пространстве и имеющей такую же форму и размеры, как щель, при приложении к пластинке электродвижущей силы той же частоты в аналогичных точках.

Идентичность электромагнитных полей идеальной щелевой антенны и пластинчатого вибратора относится не только к дальней зоне излучения, но также к зоне непосредственно примыкающей к щели и соответственно вибратору, как и к другим зонам. А поскольку электрический и магнитный векторы связаны с током и напряжением идентичными интегральными соотношениями, из этого следует, что определение напряжения вдоль щели такое же, как распределение тока по вибратору (близкое к синусоидальному). И распределение тока по кромке щели такое же, как распределение напряжения по вибратору (близко к косинусоидальному). Отсюда следует, что входная проводимость щелевой антенны с точностью до постоянного множителя определяется входным сопротивлением $Z_{\text{ВХ.СВ}}$ симметричного вибратора

$$Y_{\text{ВХ.щ.}} = \frac{Z_{\text{ВХ.СВ}}}{(60\pi)^2} = \frac{Z_{\Sigma\text{СВ}} - j\rho_{\text{СВ}}\text{ctg}(kl)}{(60\pi)^2}, \quad (2.1)$$

где $Z_{\Sigma\text{СВ}}$ — сопротивление излучения симметричного вибратора с длиной плеч l ;

$$\rho_{\text{СВ}} = 120 \left(\ln \left(\frac{1}{r_0} \right) - 1 \right) \quad \text{— волновое сопротивление эквивалентного}$$

вибратора с радиусом проводников $r_0 = \frac{d_0}{4}$; d_0 — ширина щели; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

Из (2.1) следует, что при длине щели $l_{\text{щели}} = 2l = \frac{\lambda}{2}$ (полуволновая щель), она является резонансной, однако для получения резонанса реальную

щель приходится «укорачивать» аналогично укорочению вибратора. Величина укорочения Δl может быть определена по формуле

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{0,225}{\ln\left(\frac{4l}{d_0}\right)}. \quad (2.2)$$

Для того чтобы щель максимально излучала, она должна располагаться перпендикулярно линиям тока на поверхности волновода, либо, что то же самое, — параллельно магнитным силовым линиям (последнее более наглядно).

Полагая, что взаимное влияние щелей пренебрежимо мало, а размеры и интенсивность их возбуждения одинакова, можно рассчитать диаграмму направленности волноводно-щелевой антенны (ВЩА) в H -плоскости по обобщенной формуле

$$F(\theta) = 20 \lg \left\{ F_1(\theta) \frac{\sin(0,5N(kd \sin \theta - \psi_0))}{N \sin(0,5(kd \sin \theta - \psi_0))} \right\}, \quad (2.3)$$

где N — число щелей; d — расстояние между щелями;

ψ_0 — разность фаз токов возбуждения соседних щелевых излучателей;

θ — пространственный угол, отсчитываемый в H -плоскости от нормали к плоскости антенны;

$F_1(\theta)$ — функция направленности одиночного излучателя.

ДН щели длиной $l_{\text{щели}} = 2l$ в H -плоскости рассчитывается по формуле:

$$F_1(\theta) = \left| \frac{\cos(kl \sin \theta) - \cos(kl)}{\cos \theta [1 - \cos(kl)]} \right|. \quad (2.4)$$

В плоскости E продольный волноводу щелевой излучатель в отличие от электрического вибратора не является всенаправленным вследствие влияния ограниченных размеров стенок волновода. Расчет функции направленности в этом случае сложен и в лабораторной работе не рассматривается.

Так как в резонансной ВЩА щели возбуждаются синфазно, то

$$\psi_{0\text{РВЩА}} = 0.$$

При синфазном возбуждении щелевых излучателей главный максимум ДН резонансной ВЩА направлен вдоль нормали к полотну антенной решетки.

Так как в нерезонансной ВЩА щели, расположенные в шахматном порядке (см. рис. 2.2) и возбуждаются не синфазно, то

$$\psi_{0\text{НВЩА}} = d \frac{2\pi}{\lambda_B} + \pi, \quad (2.5)$$

где $\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}$ — длина волны в волноводе;

a — размер широкой стенки поперечного сечения волновода.

Линейное изменение фазы токов возбуждения вдоль полотна антенны приводит к отклонению главного максимума ДН нерезонансной ВЩА на некоторый угол. Направление максимального излучения нерезонансной ВЩА образует с нормалью к плоскости расположения щелей угол

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{\psi_0 \lambda}{2\pi d}. \quad (2.6)$$

Нули функции диаграммы направленности в общем случае определяются по формуле

$$\sin \theta_{0i} = i \frac{\lambda}{Nd} + \frac{\psi_0 \lambda}{2\pi d},$$

где $i = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$

Ширина главного лепестка диаграммы направленности ВЩА по нулевому уровню рассчитывается по формуле

$$2\Delta\theta_0 = 2\arcsin \frac{\lambda}{Nd}. \quad (2.7)$$

Ширина главного лепестка диаграммы направленности ВЩА на уровне половинной мощности рассчитывается по формуле

$$2\Delta\theta_{0,5} = 0,88 \frac{\lambda}{Nd}, [\text{рад}] \text{ или } 2\Delta\theta_{0,5} = 51 \frac{\lambda}{Nd}, [\text{град}]. \quad (2.8)$$

При заданном значении угла $\theta_{\max}$ можно определить требуемое значение d для нерезонансной ВЩА по формуле

$$d = \frac{\lambda \lambda_B}{2(\lambda_B \sin \theta_{\max} - \lambda)}. \quad (2.9)$$

При оценке расстояния d между щелями необходимо также обратить внимание на ограничения этой величины в решетке из ненаправленных излучателей. Для того, чтобы антенна имела один главный максимум и чтобы боковые максимумы убывали с увеличением их номера, должно выполняться условие

$$d < \frac{\lambda}{2(1 + \sin \theta_{\max})}. \quad (2.10)$$

Направленные свойства щели позволяют увеличивать d , по сравнению с условием (2.10), чем и объясняется допустимость выбора d даже равного длине волны в волноводе.

Определение проводимостей и сопротивлений щелей для многоэлементной антенны производится в пренебрежении взаимным влиянием соседних щелей, что оказывается возможным, так как в большинстве случаев щели располагаются на расстоянии, приблизительно равном $\lambda_B/2$.

Нормированная (к волновому сопротивлению волновода) проводимость одиночной щели длиной $\lambda/2$, расположенной вдоль широкой стенки волновода, определяется по формуле

$$G = 2,09 \frac{a}{b} \frac{\lambda_B}{\lambda} \sin^2 \frac{\pi x_1}{a} \cos^2 \frac{\pi \lambda}{2 \lambda_B}. \quad (2.11)$$

где $a = 0,023$ м и $b = 0,01$ м — размеры широкой и узкой стенок поперечного сечения волновода, соответственно, x_1 — смещение щели относительно средней линии широкой стенки волновода.

2.5. Порядок выполнения работы

2.5.1. Порядок выполнения теоретических исследований

а) Рассчитать и построить в прямоугольной системе координат нормированные ДН резонансной волноводно-щелевой антенны в H -плоскости в пределах сектора углов $\theta \in [-50^\circ, 50^\circ]$ для двух заданных значений числа щелей в антенне на частоте f_1 , используя формулы (2.3), (2.4) при $\psi_0 = 0^\circ$.

б) Рассчитать и построить в прямоугольной системе координат нормированную ДН нерезонансной волноводно-щелевой антенны в H -плоскости в пределах сектора углов $\theta \in [-50^\circ, 50^\circ]$ для заданного значения частоты f_2 , используя формулы (2.3), (2.4) и (2.5).

в) Рассчитать положение главного максимума и ширину главного лепестка ДН нерезонансной волноводно-щелевой антенны в диапазоне частот $(f_3 - f_4)$ по формулам (2.6) и (2.8), соответственно. Построить графики рассчитанных зависимостей.

г) Рассчитать резонансное укорочение щелей Δl для частоты f_2 нерезонансной ВЩА по формуле (2.2), полагая, что ширина щелевых излучателей составляет 0,5 мм. Длина неукороченной щели $l_{\text{щели}} = \lambda/2$. Параметры поперечного сечения волновода $a \times b = 0,023 \times 0,01$ м.

д) Рассчитать нормированные проводимости щелевых излучателей в нерезонансной ВЩА при $x_1 = 0,005$ м на частотах f_3 и f_4 по формуле (2.11).

е) Для щелевых излучателей резонансной и нерезонансной ВЩА на частотах f_1 и f_2 , соответственно, подобрать x_1 , при которых обеспечивается согласование ВЩА с питающим волноводом, т.е. выполняется условие $N \cdot G = 1$ (N — количество щелевых излучателей)

2.5.2. Порядок выполнения экспериментальных исследований

а) Включить генератор и селективный усилитель. Установить частоту колебаний на выходе генератора, равную f_1 .

б) Подключить детекторную секцию ко входу резонансной ВЩА.

в) Установить в резонансной ВЩА количество щелей, равное n_1 , воспользовавшись подвижным короткозамыкающим поршнем, перемещая его вдоль полотна излучателей.

г) Повернуть исследуемую антенну в горизонтальной плоскости в

направлении на вспомогательную антенну так, чтобы получить максимальное показание на микровольтметре. При этом максимальное показание микровольтметра принять за $f(\theta_0)$, а зафиксированное направление принять за $\theta_0 = 0^\circ$ (рис. 2.3).

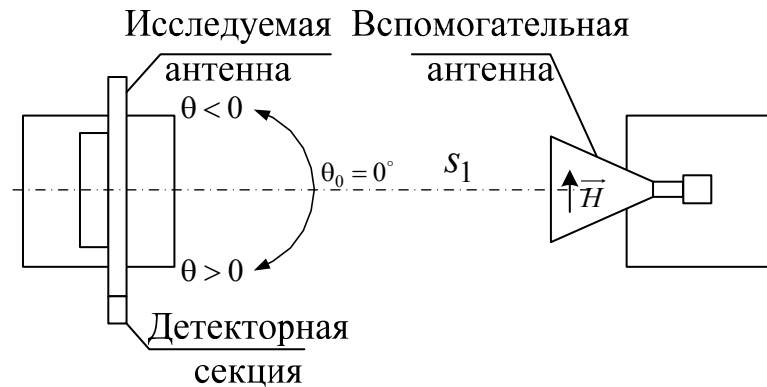


Рисунок 2.3 — Измерение диаграмм направленности ВЩА в H -плоскости.
Вид сверху на измерительный стенд

д) Провести измерения ДН резонансной ВЩА (рис. 2.3) в H -плоскости:
— из положения, соответствующего θ_0 , нужно исследуемую антенну поворачивать вокруг вертикальной оси однокоординатного опорно-поворотного устройства **по часовой стрелке**, пока показания микровольтметра не составят $f(\theta_1) = 0,5f(\theta_0)$ (рис. 2.4); записать полученные данные (значение угла θ_1 и показания микровольтметра как величину $f(\theta_1)$);

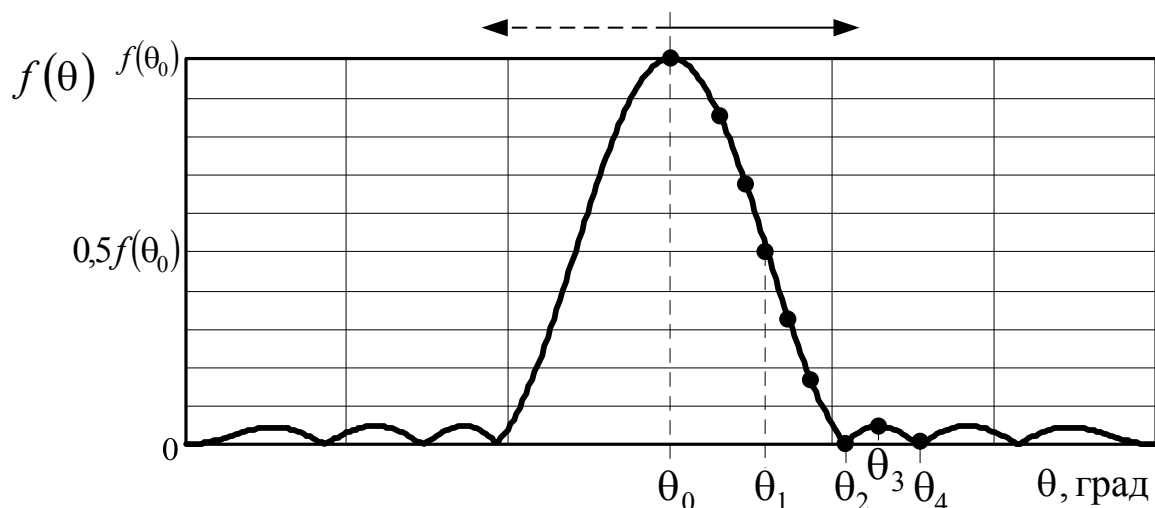


Рисунок 2.4 — Методика измерения диаграммы направленности резонансной волноводно-щелевой антенны

— определить направление первого минимума в диаграмме направленности θ_2 (рис. 2.4) и значение $f(\theta_2)$;

— на интервалах углов $\theta \in (\theta_0, \theta_1)$ и $\theta \in (\theta_1, \theta_2)$ **произвести измерение**

ДН антенны в двух дополнительных точках на каждом из интервалов;

— повернуть антенну на угол $\theta > \theta_2$ и определить направления, соответствующие первому боковому максимуму $f(\theta_3)$ и следующему минимуму ДН $f(\theta_4)$;

— повернуть антенну в исходное положение, соответствующее углу θ_0 ;

— повторить аналогичный порядок измерений при вращении антенны **против часовой стрелки**.

е) Установить на резонансной ВЩА количество щелей, равное n_2 .

Выполнить измерение ДН ВЩА по п. д).

ж) Подключить детекторную секцию ко входу нерезонансной ВЩА.

з) Установить на генераторе частоту f_2 .

и) Значение угла θ_0 принять **таким же**, как при измерениях резонансной ВЩА.

к) Плавно поворачивая нерезонансную ВЩА вокруг оси опорно-поворотного устройства, определить направление θ' , в котором показания микровольтметра достигнут максимума. Записать это направление как $\theta_{\max} = \theta_0 - \theta'$ и записать показания микровольтметра как $f(\theta_{\max})$.

л) Выполнить измерение ДН нерезонансной ВЩА в соответствии с операциями по п. д), **с той разницей**, что измерения проводить относительно направления $\theta_{\max}$ (рис. 2.5).

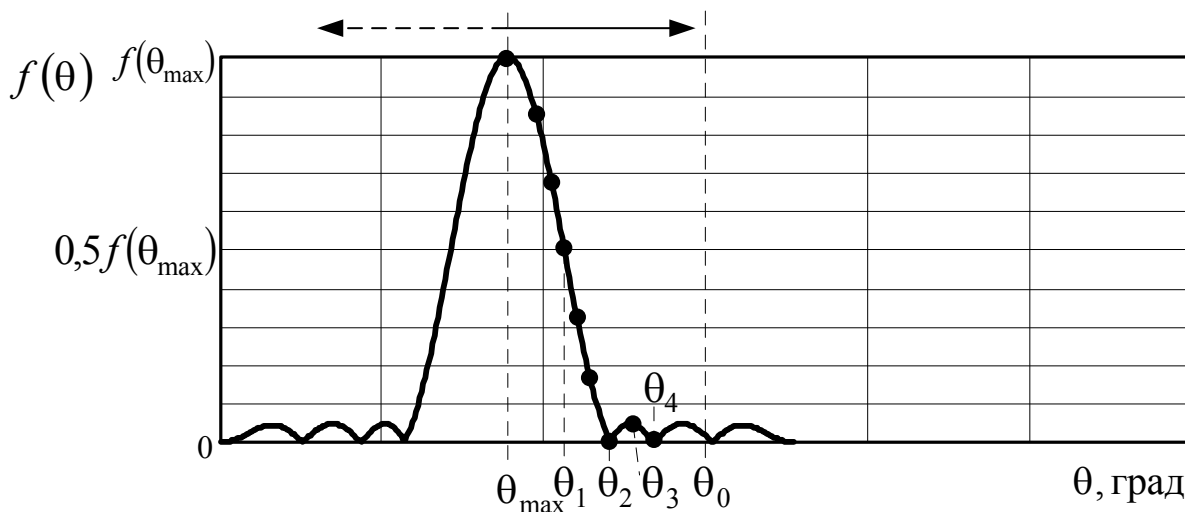


Рисунок 2.5 — Методика измерения диаграммы направленности нерезонансной волноводно-щелевой антенны

м) Последовательно устанавливать на генераторе частоты f_3 , f_2 , f_4 и в каждом случае определять угловое положение главного максимума ДН нерезонансной ВЩА $\theta_{\max 1,2,3}$ — **аналогично п. к)**.

2.5.3. Обработка результатов измерений

а) Для измерений ДН **резонансной** ВЩА с количеством щелей, равным n_1 :

— пересчитать значения всех углов относительно значения угла θ_0 (см. табл. 2.2, две верхние строки);

— про нормировать и перевести в децибелы измеренные значения показаний микрольтметра по формуле

$$F(\theta) = 10 \lg \left(\frac{f(\theta)}{f(\theta_0)} \right);$$

— все результаты пересчетов занести в таблицу (табл. 2.2).

б) Для измерений ДН **резонансной** ВЩА с количеством щелей, равным n_2 , заполнить таблицу в порядке, аналогичном п. а).

Таблица 2.2 — Пример заполнения таблицы с результатами измерений в одной плоскости

	θ_0								
Отсчет, град	80	85	90	95	100	105	110	115	120
θ , град	–40	–35	–30	–25	–20	–15	–10	–5	0
$f(\theta)$	0,1	5	0,1	20	35	50	65	80	100
$F(\theta)$, дБ	–30	–13	–30	–7	–4,6	–3	–1,8	–1	0

	θ_0								
Отсчет, град	120	125	130	135	140	145	150	155	160
θ , град	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$f(\theta)$	100	83	60	50	30	15	0,5	7	0,5
$F(\theta)$, дБ	0	–0,8	–2,2	–3	–5,2	–8,2	–23	–11	–23

в) Построить в одной **декартовой системе координат** в децибелах диаграммы направленности ($F(\theta)$, дБ) для двух экспериментально исследованных **резонансных** ВЩА.

г) Для измерений ДН **нерезонансной** ВЩА, заполнить таблицу в порядке, аналогичном п. а), с той разницей, что в таблице *за средний угол принимается рассчитанный* $\theta_{\max}$ вместо θ_0 .

д) Построить в декартовой системе координат в децибелах диаграмму направленности ($F(\theta)$, дБ) экспериментально исследованной **нерезонансной** ВЩА.

е) Заполнить таблицу с результатами измерений частотной зависимости угла $\theta_{\max}$ для нерезонансной ВЩА (табл. 2.3).

Таблица 2.3 — **Пример** заполнения таблицы с данными измерений частотной зависимости угла $\theta_{\max}$ для нерезонансной ВЩА

f , ГГц	9,2	9,5	9,8
$\theta_{\max}$, град	–3	–2	–1

ж) Сравнить результаты теоретического и экспериментального исследований.

з) Сделать выводы по работе.

2.6. Контрольные вопросы и задания

2.6.1. Вопросы для допуска к лабораторной работе

а) Опишите состав измерительной установки для исследования внешних характеристик ВЩА.

б) Что входит в программу экспериментальных измерений характеристик ВЩА?

в) Опишите методику измерения диаграммы направленности резонансной волноводно-щелевой антенны.

г) Опишите методику измерения диаграммы направленности нерезонансной волноводно-щелевой антенны.

д) Чем конструктивно отличаются резонансная и нерезонансная ВЩА?

2.6.2. Задания для подготовки к защите лабораторной работы

а) Для резонансной ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода, рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную ДН в H -плоскости, если количество щелей $N=8$, сечение волновода $a \times b = 0,023 \times 0,01$ м, рабочая длина волны $\lambda = 0,037$ м.

б) Для резонансной ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода, рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную ДН в H -плоскости, если количество щелей $N = 22$, сечение волновода $a \times b = 0,023 \times 0,01$ м, рабочая длина волны $\lambda = 0,029$ м.

в) Резонансная ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода с сечением $a \times b = 0,072 \times 0,034$ м, состоит из $N = 10$ щелей и работает на длине волны $\lambda = 0,1$ м. На какое расстояние следует сместить щели относительно середины широкой стенки волновода, чтобы в возбуждающем антенну волноводе установился режим бегущих волн, для которого должно выполняться условие $GN = 1$ (G — проводимость щелевого излучателя).

г) Резонансная ВЩА, имеющая $N=20$ продольных полуволновых щелей, работает на длине волны $\lambda = 0,08$ м. На какое расстояние следует сместить щели относительно середины широкой стенки волновода, чтобы в возбуждающем антенну волноводе установился режим бегущих волн, для которого должно выполняться условие $GN = 1$ (G — проводимость щелевого

излучателя)? Сечение волновода $a \times b = 0,061 \times 0,01$ м.

д) Нерезонансная ВЩА, выполненная на волноводе сечением $a \times b = 0,0285 \times 0,0126$ м, работает на длине волны $\lambda = 0,038$ см. Определить, на какой угол смещается главный максимум нормированной ДН антенны относительно нормали к широкой стенке волновода, при сдвиге фаз между токами двух соседних щелевых излучателей $\psi_{0\text{НВЩА}} = 3,9$ рад.

е) Для нерезонансной ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода, рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную ДН в H -плоскости, если количество щелей $N=8$, сечение волновода $a \times b = 0,023 \times 0,01$ м, рабочая длина волны $\lambda = 0,03$ м. Требуется обеспечить $\theta_{\max} = 20^\circ$.

ж) Для нерезонансной ВЩА с продольными щелями, прорезанными в широкой стенке волновода, рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную ДН в H -плоскости, если количество щелей $N=25$, сечение волновода $a \times b = 0,023 \times 0,01$ м, рабочая длина волны $\lambda = 0,038$ м. Требуется обеспечить $\theta_{\max} = 10^\circ$.

з) Чем отличаются режимы возбуждения резонансной и нерезонансной ВЩА?

и) Чем отличаются характеристики резонансной и нерезонансной волноводно-щелевых антенн с одинаковыми параметрами волновода и количеством щелевых излучателей?

к) Как выбирается расстояние между щелевыми излучателями в резонансной ВЩА?

л) Как выбирается расстояние между щелевыми излучателями в нерезонансной ВЩА?

м) Как изменится диаграмма направленности резонансной ВЩА при увеличении количества щелевых излучателей?

н) Как изменится диаграмма направленности нерезонансной ВЩА при изменении рабочей частоты?

о) Как выбирается длина щелевых излучателей?

п) Для чего требуется резонансное укорочение щелевых излучателей?

р) Поясните, на что повлияет смещение щелевых излучателей относительно середины широкой стенки волновода?

с) Как определяется длина волны в волноводе?

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАБОЛИЧЕСКИХ АНТЕНН

3.1. Цель работы

Изучить принцип действия, методику расчета диаграмм направленности параболических антенн. Приобрести навыки в измерении внешних характеристик параболических антенн.

3.2. Описание измерительной установки

Измерительная установка (рис. 3.1) включает: исследуемую антенну 1, вспомогательную антенну 2, опорно-поворотное устройство для исследуемой антенны 3, опорно поворотное устройство для вспомогательной антенны 4, СВЧ генератор 5, детекторную секцию 6, селективный микровольтметр 7.

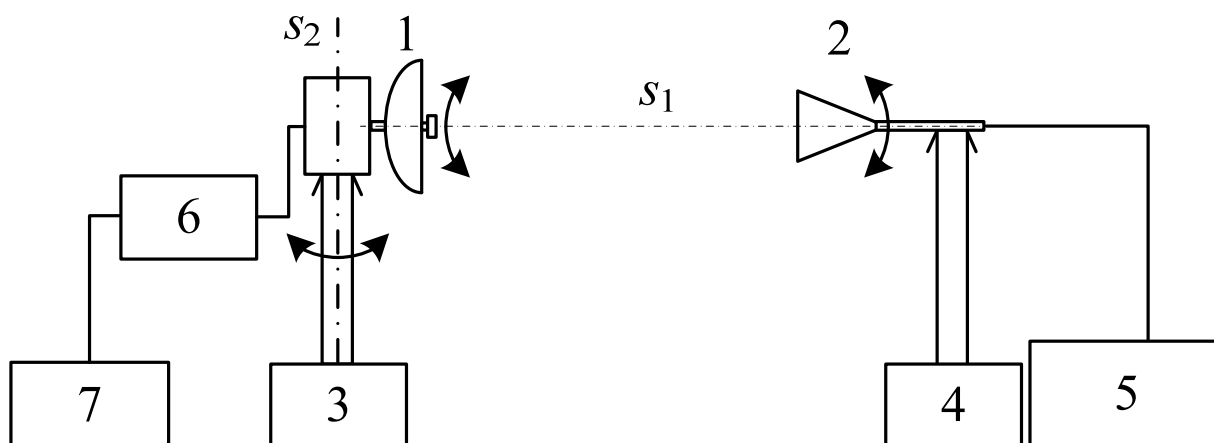


Рисунок 3.1 — Структурная схема измерительной установки

Расстояние между исследуемой и вспомогательной антеннами выбирается из условия размещения приемной антенны в дальней зоне передающей антенны. Высота подвеса антенн выбирается из условия минимального влияния волны, отраженной от подстилающей поверхности.

Опорно-поворотное устройство 3 позволяет вращать исследуемую антенну вокруг осей s_1 и s_2 . Однокоординатное опорно-поворотное устройство 4 позволяет вращать вспомогательную антенну вокруг оси s_1 .

3.3. Исходные данные

Исходными данными для теоретических исследований являются: номера двух параболических антенн, габариты апертур $d_{31} \times d_{32}$ и глубина зеркал L_3 (рис. 3.2), рабочие частоты f_1 и f_2 (табл. 3.1).

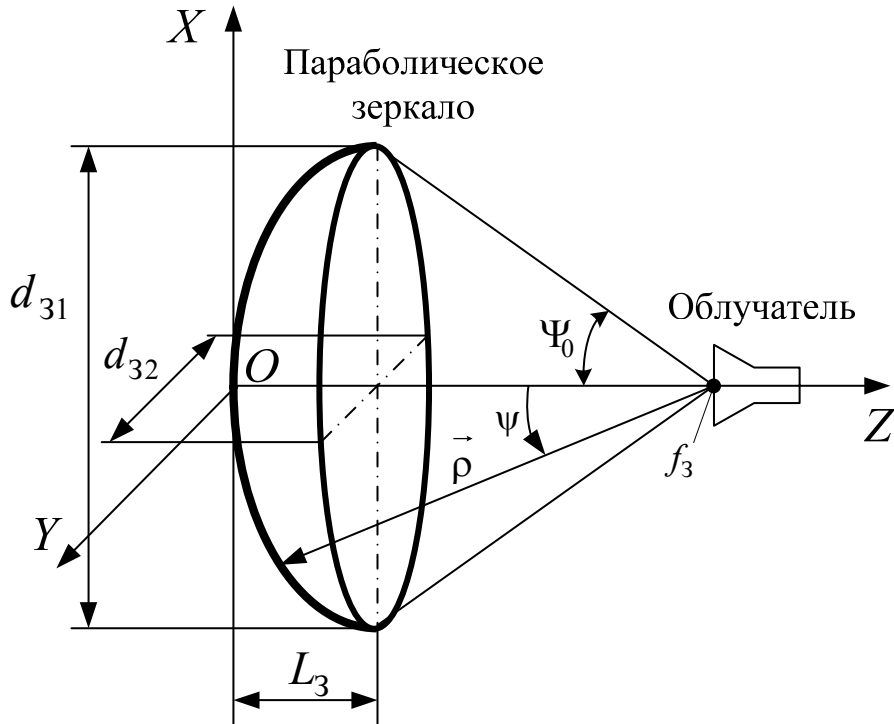


Рисунок 3.2 — Схема параболической зеркальной антенны

Таблица 3.1 — Исходные данные для выполнения теоретических и экспериментальных исследований

M	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип антенны	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2
f_1 , ГГц	9,0	8,6	9,4	8,7	9,6	8,9	9,2	9,1	9,6	9,3
N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип антенны	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1
f_2 , ГГц	9,5	9,5	9,7	9,2	8,6	9,4	8,8	9,5	9,0	9,1

Примечание. Типы зеркальных антенн:

A1 — параболоид вращения ($d_{31} = d_{32} = 0,3$ м, $L_3 = 0,046$ м);

A2 — усеченный параболоид ($d_{31} \times d_{32} = 0,41 \times 0,275$ м, $L_3 = 0,085$ м)

3.4. Методика расчета характеристик параболических зеркальных антенн

3.4.1. Особенности построения параболических зеркальных антенн

Параболические антенны используются в радиотехнических системах различного назначения (радиорелейные системы связи, радиолокационные станции, спутниковые системы связи и телевидение, системы радиоуправления и т. д.). Наибольшее распространение получили антенны с зеркалами в виде параболоида вращения, параболического цилиндра и вырезки из параболоида вращения. Широкое распространение этих антенн объясняется возможностью формирования самых разнообразных диаграмм направленности при относительной простоте конструкции, достаточно высоком КПД и малой шумовой температуре.

Параболическая антенна конструктивно состоит из двух элементов — зеркала и облучателя (рис. 3.2). Геометрические параметры зеркала (рефлектора):

- габариты раскрыва (апертуры) $d_{31} \times d_{32}$;
- фокусное расстояние параболоида f_3 ;
- угол раскрыва зеркала Ψ_0 ;
- глубина зеркала L_3 .

Если $\Psi_0 < 90^\circ$ ($d_3 < 4f_3$), то параболоид называют длиннофокусным, тогда как при $\Psi_0 > 90^\circ$ ($d_3 > 4f_3$) — короткофокусным.

Симметричный параболический профиль зеркала описывается:

- в прямоугольной системе координат уравнением

$$y^2 = x^2 = 4f_3z; \quad (3.1)$$

- в полярной системе координат (рис. 3.2) соотношением

$$\rho(\psi) = \frac{2f_3}{1 + \cos\psi}. \quad (3.2)$$

Геометрические параметры параболического отражателя связаны между собой соотношениями:

$$\Psi_0 = 2\text{arcctg}\left(\frac{4f_3}{d_3}\right); \quad L_3 = f_3 \text{tg}^2 \frac{\Psi_0}{2}. \quad (3.3)$$

Как правило, соотношение между фокусным расстоянием и диаметром раскрыва (апертуры) параболического зеркала выбирается исходя из типа облучателя согласно значений, приведенных в табл. 3.2.

Таблица 3.2 — Рекомендуемое соотношение для выбора значений f_3 и d_3

Тип облучателя	f_3/d_3
Полуволновый вибратор с рефлектором в виде стержня	0,34 — 0,4
Полуволновый вибратор с рефлектором в виде сплошного экрана	0,4 — 0,5
Рупорный или щелевой облучатель	0,5 — 0,625

Облучатель является важным элементом параболической зеркальной антенны, в значительной степени определяющим ее характеристики. В качестве облучателей используются слабонаправленные антенны, удовлетворяющие следующим основным требованиям:

- диаграмма направленности облучателя должна обеспечивать необходимое амплитудное распределение поля на излучающем раскрыве зеркала (в апертуре);
- фазовый центр облучателя необходимо совместить с точкой фокуса зеркала;
- рабочая полоса частот облучателя должна соответствовать системным требованиям;
- электрическая прочность облучателя должна быть достаточной для излучения без пробоя заданной мощности;
- поперечные размеры облучателя должны быть относительно небольшими для снижения затенения зеркала;
- облучатель должен обеспечивать требуемую поляризацию поля излучения;
- конструкция облучателя должна быть механически прочной.

Наибольшее применение на практике нашли облучатели следующих типов:

- вибраторные с рефлектором;
- волноводно-рупорные;
- щелевые.

В лабораторной работе исследуются макеты параболических зеркальных антенн с двухщелевым облучателем Катлера, конструкция которого показана на рис. 3.3. Щели закрывают пластинками из высокочастотного диэлектрика, что обеспечивает герметизацию облучателя. Для согласования питающего волновода его суживают вблизи плоскости сопряжения с резонатором и используют реактивный настроечный штырь на закорачивающей стенке резонатора, в котором прорезаны щелевые излучатели. Двухщелевой облучатель имеет сферическую фазовую характеристику и отличается низким уровнем заднего излучения. Поперечные размеры облучателя малы, что обеспечивает малое затенение.

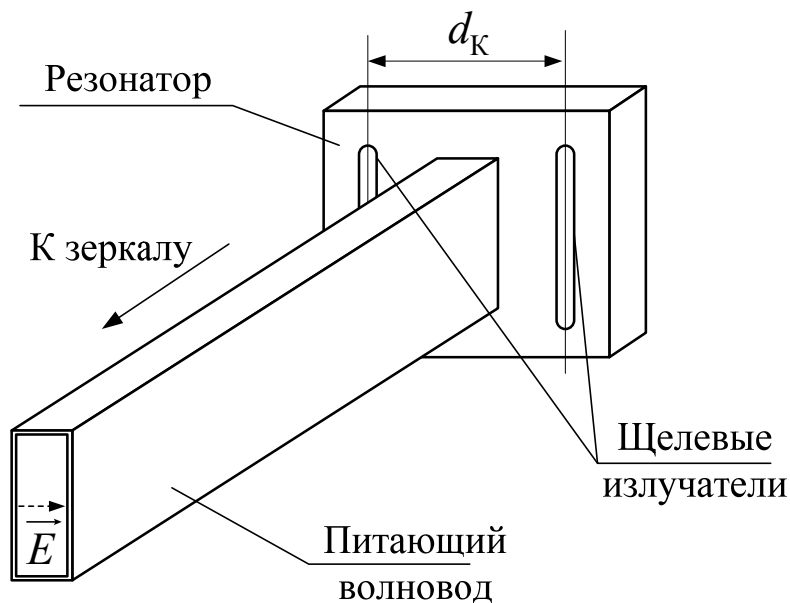


Рисунок 3.3 — Модель облучателя Катлера

Диаграмма направленности двухщелевого облучателя рассчитывается по формуле [5]:

$$f_{\text{обл}}(\psi, \alpha) = \sqrt{\cos^2\left(\frac{kd_K}{2} \sin \psi\right) \sin^2(\alpha) + \left(\frac{\cos\left(k \frac{l_K}{2} \sin \psi\right) - \cos\left(k \frac{l_K}{2}\right)}{\cos \psi}\right)^2 \cos^2(\alpha)}. \quad (3.4)$$

Тогда, в основных плоскостях ДН облучателя определяется выражениями:

— в E -плоскости

$$f_E(\psi) = \cos\left(\frac{kd_K}{2} \sin \psi\right); \quad (3.5)$$

где d_K — расстояние между щелевыми излучателями;

— в H -плоскости

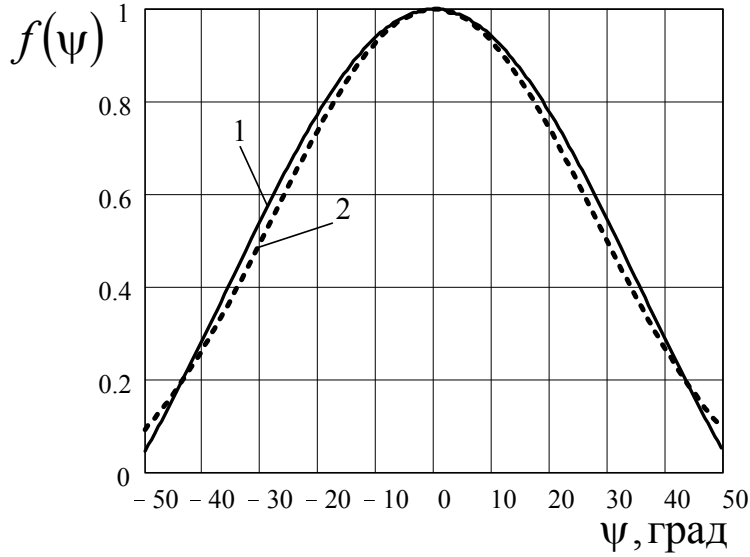
$$f_H(\psi) = \frac{\cos\left(k \frac{l_K}{2} \sin \psi\right) - \cos\left(k \frac{l_K}{2}\right)}{\cos \psi}. \quad (3.6)$$

Необходимые для расчета ДН облучателя геометрические параметры облучателей исследуемых параболических антенн приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 — Геометрические параметры облучателей исследуемых параболических антенн

Тип антенны	Длина щелевых излучателей l_K , м	Расстояние между щелевыми излучателями d_K , м
A1	0,02	0,015
A2	0,03	0,015

На рис. 3.4 показан пример расчета диаграмм направленности облучателя зеркальной антенны А1 в E - и H -плоскостях на частоте 9,5 ГГц.



1 — ДН облучателя в E -плоскости; 2 — ДН облучателя в H -плоскости
Рисунок 3.4 — Диаграммы направленности облучателя одной из зеркальных антенн на частоте 9,5 ГГц

3.4.2. Методика расчета диаграмм направленности параболической антенны

На рис. 3.5 показана модель параболической антенны с указанием систем отсчета, используемых для расчета амплитудного распределения поля в апертуре и в дальней зоне антенны.

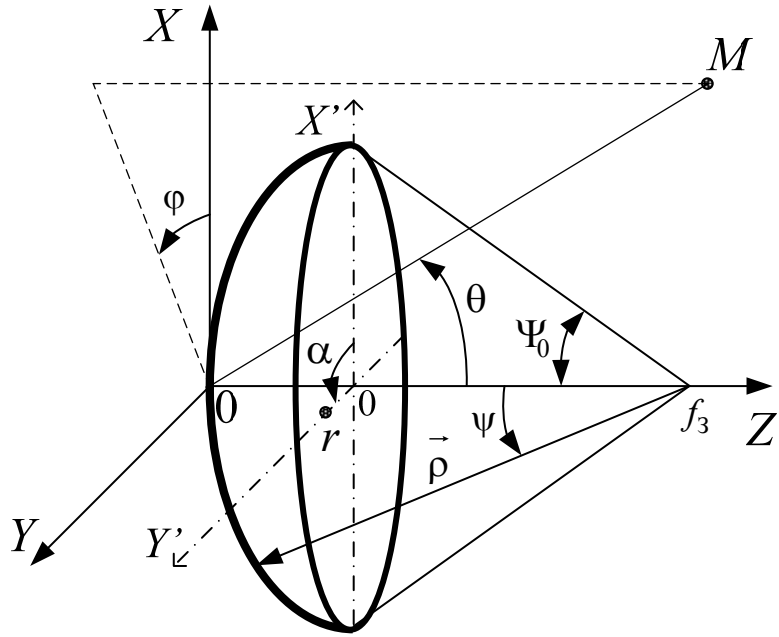


Рисунок 3.5 — Описание систем отсчета, используемых для расчета амплитудного распределения поля в апертуре и в дальней зоне антенны

Направленные свойства антенны определяются размерами зеркала и амплитудно-фазовым распределением поля в апертуре (раскрыве) антенны. Фазовое распределение поля на апертуре при выполнении требований к установке облучателя можно считать равномерным (то есть близким к синфазному). Амплитудное распределение поля на раскрыве зеркала зависит, главным образом, от формы диаграммы направленности облучателя. В большинстве случаев амплитуда поля на раскрыве спадает от максимального значения в центре до некоторого значения на краю раскрыва зеркала (рис. 3.6). Осесимметричное распределение амплитуды поля на поверхности апертуры зеркала $A(r, \alpha)$ можно аппроксимировать функцией вида:

$$A(r, \alpha) = 1 - (1 - \Delta) \cdot \left(\frac{r}{a_3} \right)^2, \quad (3.9)$$

где r , α — координаты точки в раскрыве параболического отражателя (рис. 3.5); Δ — относительная амплитуда напряженности электрического поля по краю раскрыва; $a_3 = \frac{d_3}{2}$ — радиус раскрыва зеркала.

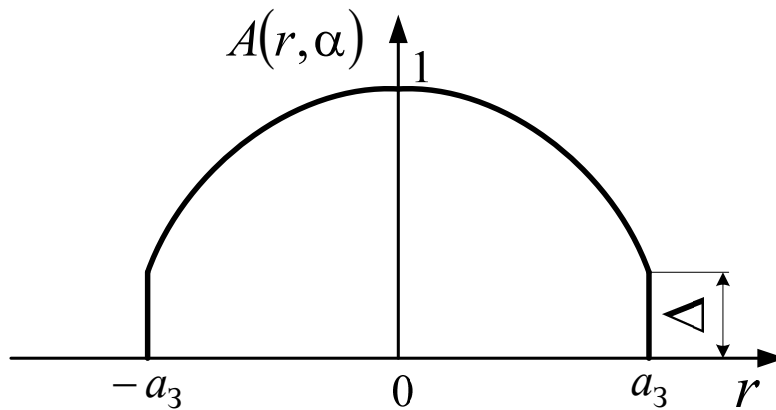


Рисунок 3.6 — Нормированное распределение амплитуды напряженности электрического поля в сечении раскрыва зеркала

Для расчета диаграммы направленности (ДН) параболической антенны используется система отсчета углов θ и φ , показанная для произвольной точки наблюдения M на рис. 3.5.

Перед расчетом ДН параболической антенны необходимо производить приближенную оценку некоторых важных параметров ДН, таких как:

- ширина главного лепестка ДН на уровне половинной мощности — $2\theta_{0,5}^E$ (в E -плоскости при $\varphi = 90^\circ$) и $2\theta_{0,5}^H$ (в H -плоскости при $\varphi = 0^\circ$);
- уровень первого бокового лепестка определяемый по напряженности поля величиной $\gamma_{бок}$ в децибелах принимает значение

$$\gamma_{бок, дБ} = 20 \lg \frac{|E_{бок, дБ}|}{|E_{max}|}.$$

Для распределения $A(r, \alpha)$, определяемого по формуле (3.9), основные характеристики диаграммы направленности параболической антенны можно оценить по данным, приведенным в табл. 3.3

Таблица 3.3 — Характеристики диаграммы направленности зеркальной антенны со спадающим распределением поля в раскрыве зеркала

Δ	$2\theta_{0,5}^{E,H}$, град	$\gamma_{бок}$, дБ
0,1	$67,4\lambda/(2a)$	-24,3
0,2	$66,4\lambda/(2a)$	-23
0,3	$64,8\lambda/(2a)$	-22
0,4	$63,6\lambda/(2a)$	-21,5
0,5	$62,8\lambda/(2a)$	-20,5
0,6	$61,4\lambda/(2a)$	-19,9
0,7	$60,2\lambda/(2a)$	-19,36
0,8	$59,8\lambda/(2a)$	-18,8
0,9	$59\lambda/(2a)$	-18,0
1,0	$58,5\lambda/(2a)$	-17,6

При синфазном возбуждении апертуры антенны в виде параболоида вращения ее диаграмма направленности рассчитывается по следующему выражению

$$f(\theta, \varphi) = (1 + \cos \theta) \int_0^{2\pi} \int_0^{a_3} A(r, \alpha) \exp[jk r \sin \theta \cos(\varphi - \alpha)] r dr d\alpha. \quad (3.10)$$

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

С учетом реальных диаграмм направленности облучателя в E - и H -плоскостях амплитудное распределение поля на излучающем раскрыве зеркала определяется с помощью соотношения

$$A(r, \alpha) = \frac{f_{обл}(\psi(r), \alpha)}{\rho(\psi(r))}, \quad (3.11)$$

где $f_{обл}(\psi, \alpha)$ — диаграмма направленности облучателя;

r — текущая координата раскрыва зеркала;

ψ — текущий угол раскрыва; $\psi(r) = \arccos \frac{1 - (r/2f_3)^2}{1 + (r/2f_3)^2}$.

Коэффициент направленного действия параболической антенны можно определить, воспользовавшись графическим методом.

Для этого по данным, полученным при расчете ДН антенны, строятся графики нормированных диаграмм направленности по мощности

$F_E^{норм}(\theta) = \left[f^{норм}\left(\theta, \frac{\pi}{2}\right) \right]^2$ и $F_H^{норм}(\theta) = [f^{норм}(\theta, 0)]^2$ в пределах главного лепестка (рис. 3.7).

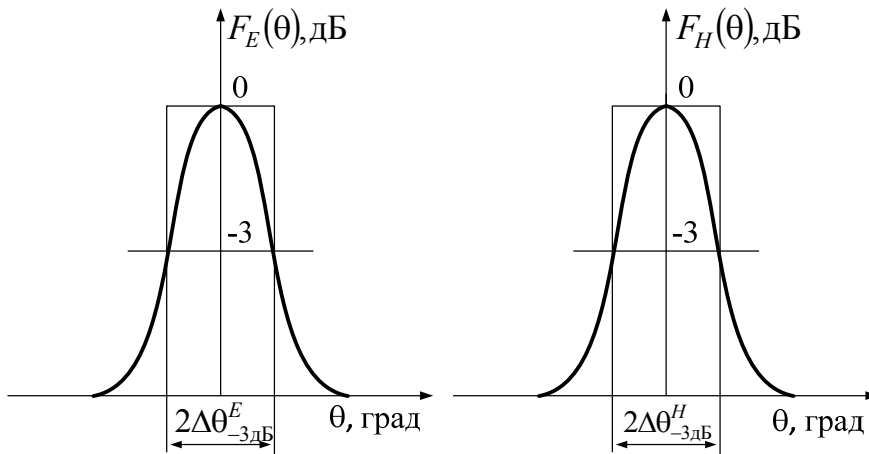


Рисунок 3.7 — Определение ширины главного лепестка диаграммы направленности на уровне половинной мощности

При вычислении КНД значения $2\Delta\theta_{-3дБ}^E$ и $2\Delta\theta_{-3дБ}^H$ в градусах подставляются в формулу

$$D = 10 \lg \left[\frac{41300}{\frac{2\Delta\theta_{-3дБ}^E}{(\text{град.})} \frac{2\Delta\theta_{-3дБ}^H}{(\text{град.})}} \right]. \quad (3.12)$$

Расчет технических допусков на отклонение формы отражающей поверхности зеркала от параболической определяется требованием сохранения синфазности возбуждения раскрыва зеркала с точностью до $\pi/2$. Этому условию соответствуют следующие технологические и конструктивные ограничения:

— допустимое отклонение профиля поверхности зеркала

$$\delta_{\text{доп}} \leq \pm \lambda/16. \quad (3.13)$$

— допустимое смещение облучателя вдоль фокальной оси зеркала относительно точки его фокуса определяется по формуле

$$\delta_{11} \leq \frac{\lambda}{4(1 - \cos \Psi_0)}. \quad (3.14)$$

— допустимое смещение облучателя в фокальной плоскости зеркала относительно точки его фокуса определяется по формуле

$$\delta_{\perp} \leq f_3 \sin(\delta\theta_{\text{max}}), \quad (3.15)$$

где $\delta\theta_{\text{max}} = \frac{\lambda}{4a_3} \left(4 \frac{f_3^2}{a_3^2} - 1 \right)$ — предельно допустимое отклонение максимума

главного луча ДН параболической антенны от направления фокальной оси зеркала, вызванное смещением облучателя, при котором расширение главного лепестка пренебрежимо мало.

3.5. Порядок выполнения работы

3.5.1. Теоретические исследования

а) Используя соотношения (3.1) и (3.3), определить фокусное расстояние f_3 и апертурный угол Ψ_0 раскрыва для двух исследуемых параболических зеркал по известному диаметру раскрыва и глубине зеркала. Принять во внимание, что глубина зеркала $L = z_{\max}$ при $y_{\max} = a_3$.

б) Рассчитать по формулам (3.5) и (3.6) и построить в прямоугольных координатах диаграммы направленности облучателей исследуемых зеркальных антенн в E - и H -плоскостях на соответствующих индивидуальному заданию частотах. Пример оформления проведенных расчетов показан на рис. 3.4.

в) На основе выражений (3.2), (3.4), (3.10) и (3.11) рассчитать в E -плоскости ($\varphi = \pi/2$) и H -плоскости ($\varphi = 0$) диаграммы направленности для двух исследуемых параболических антенн на соответствующих индивидуальному заданию частотах. В прямоугольной системе координат построить **нормированные** ДН зеркальных антенн в децибелах, воспользовавшись формулой

$$F(\theta)_{\text{дБ}} = 20 \lg(f^{\text{норм}}(\theta)).$$

Примеры программы для выполнения расчетов диаграмм направленности зеркальной антенны показаны в **Приложении Б**.

г) По построенным в пп. в) графикам ДН зеркальных антенн в E - и H -плоскостях определить ширину главного лепестка ДН по уровню -3 дБ и максимальный уровень бокового излучения. Результаты анализа занести в табл. 3.4.

Таблица 3.4 — Характеристики диаграмм направленности исследуемых зеркальных антенн

Тип антенны	Рабочая частота, ГГц	Ширина главного лепестка ДН, град		Уровень побочного излучения, дБ	
		E -плоскость	H -плоскость	E -плоскость	H -плоскость
A1					
A2					

д) Используя данные заполненной табл. 3.4 и формулу (3.12), рассчитать КНД исследуемых параболических антенн. Результаты расчетов занести в табл. 3.5.

Таблица 3.5 — Коэффициент направленного действия исследуемых зеркальных антенн

Тип антенны	Рабочая частота, ГГц	Коэффициент направленного действия, дБ
A1		
A2		

е) На основе соотношений (3.13) — (3.15) рассчитать технические допуски на отклонение формы отражающей поверхности зеркала и допустимую область установки облучателя на соответствующих индивидуальном заданию частотах. Результаты расчетов занести в табл. 3.6.

Таблица 3.6 — Технологические допуски на изготовление параболической зеркальной антенны

Тип антенны	Рабочая частота, ГГц	$\delta_{\text{доп}}, \text{ м}$	$\delta_{11}, \text{ м}$	$\delta_{\perp}, \text{ м}$
A1				
A2				

3.3.2. Порядок выполнения экспериментальных исследований

а) Установить на генераторе частоту f_1 . Настройка генератора Г4-109 осуществляется следующим образом:

- ручкой «**Поддиапазоны**» установить нужный диапазон частот;
- при помощи ручки «**Частотомер**» установить требуемую по заданию частоту СВЧ колебаний;
- повернуть ручку «**Чувствительность**» по часовой стрелке до упора;
- добиться заметного отклонения стрелки индикатора настройки, вращая вправо-влево ручку «**Установка частоты**» нужного поддиапазона;
- плавно поворачивая ручку «**Установка частоты**», добиться максимального отклонения стрелки индикатора настройки.

Внимание! Выполняя настройку генератора, нельзя допускать «зашкала» индикатора! Для этого необходимо ручкой «Чувствительность» подбирать подходящую чувствительность прибора.

б) Установить на опорно-поворотное устройство антенну A1.

в) Подготовить антенны для измерения ДН в H -плоскости. Для этого следует повернуть исследуемую и вспомогательную антенны вокруг оси s_1 (рис. 3.6) так, чтобы у расположенных на входах антенн волноводов широкая стенка располагалась параллельно горизонтальной плоскости.

г) Повернуть исследуемую антенну в горизонтальной плоскости в направлении на вспомогательную антенну так, чтобы получить максимальное показание на микровольтметре. При этом максимальное показание микровольтметра принять за $f(\theta_0)$, а зафиксированное направление принять за $\theta_0 = 0^\circ$.

Примечание. Для измерения диаграммы направленности зеркальной антенны используется опорно-поворотное устройство с высокоточной шкалой (рис. 3.7), проградуированной в «тысячных угла», т.е. цена деления шкалы единичных отсчетов тысячных угла (рис. 3.7) связана с углом поворота антенны соотношением

$$\delta_{\text{тд}} \approx \frac{360^\circ}{6000} = 0,06^\circ. \quad (3.16)$$

Цена деления шкалы кратных отсчетов тысячных угла (рис. 3.7) связана с углом поворота антенны соотношением

$$\Delta_{\text{ТД}} = 100 \delta_{\text{ТД}} \approx 6^{\circ}. \tag{3.17}$$

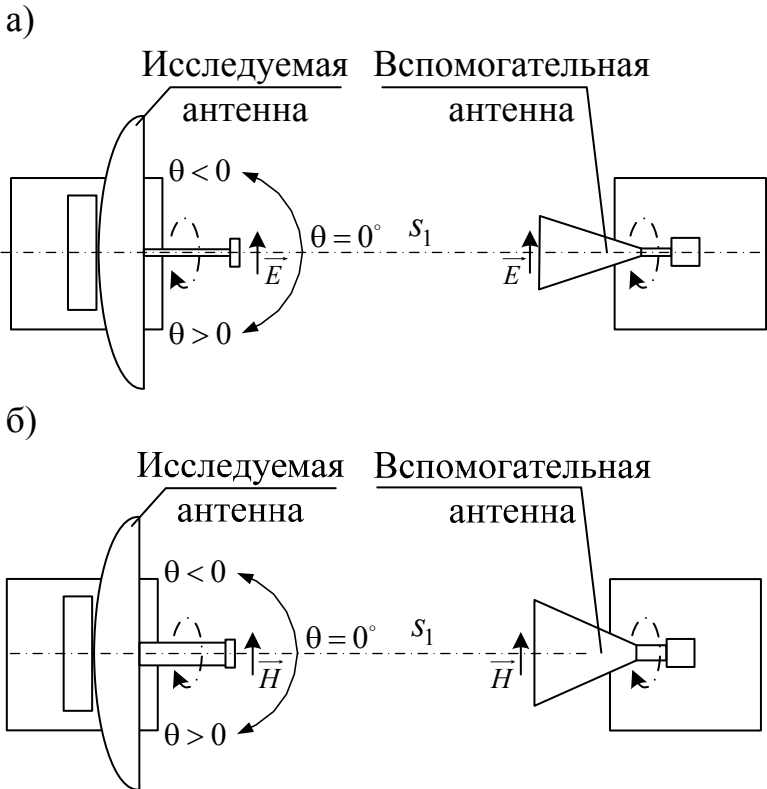
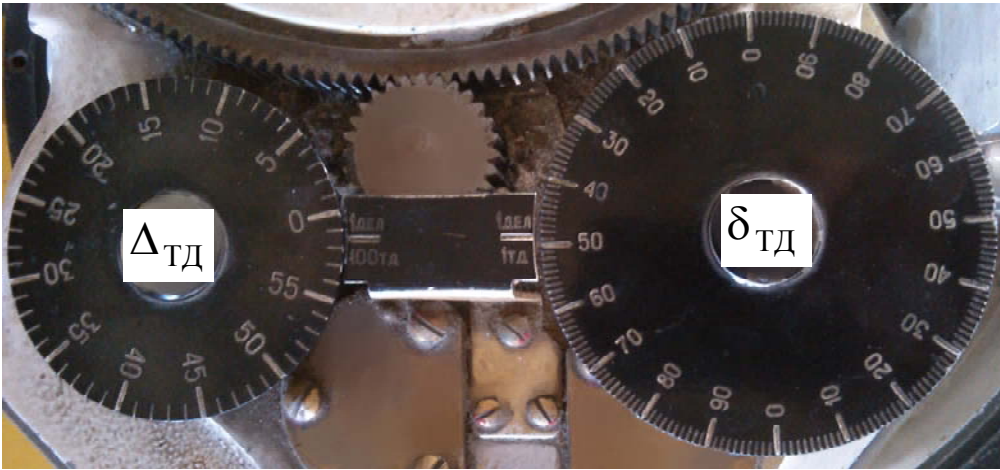


Рисунок 3.6 — Вид сверху на измерительный стенд для исследования диаграмм направленности параболической зеркальной антенны в *E*-плоскости (а) и в *H*-плоскости (б)



Шкала кратных отсчетов
тысячных угла

Шкала единичных отсчетов
тысячных угла

Рисунок 3.7 — Фотография измерительных шкал опорно-поворотного устройства.

На шкалах показан отсчет в –149 т.д., что соответствует углу –8,94°

д) Провести измерения ДН зеркальной антенны в *H*-плоскости:

— из положения, соответствующего θ_0 , нужно исследуемую антенну поворачивать вокруг вертикальной оси однокоординатного опорно-поворотного устройства **по часовой стрелке**, пока показания микровольтметра не составят $f(\theta_1) = 0,5f(\theta_0)$ (рис. 3.8); записать полученные данные (значение угла θ_1 и показания микровольтметра как величину $f(\theta_1)$);

— определить направление первого минимума в диаграмме направленности θ_2 (рис. 3.8) и значение $f(\theta_2)$;

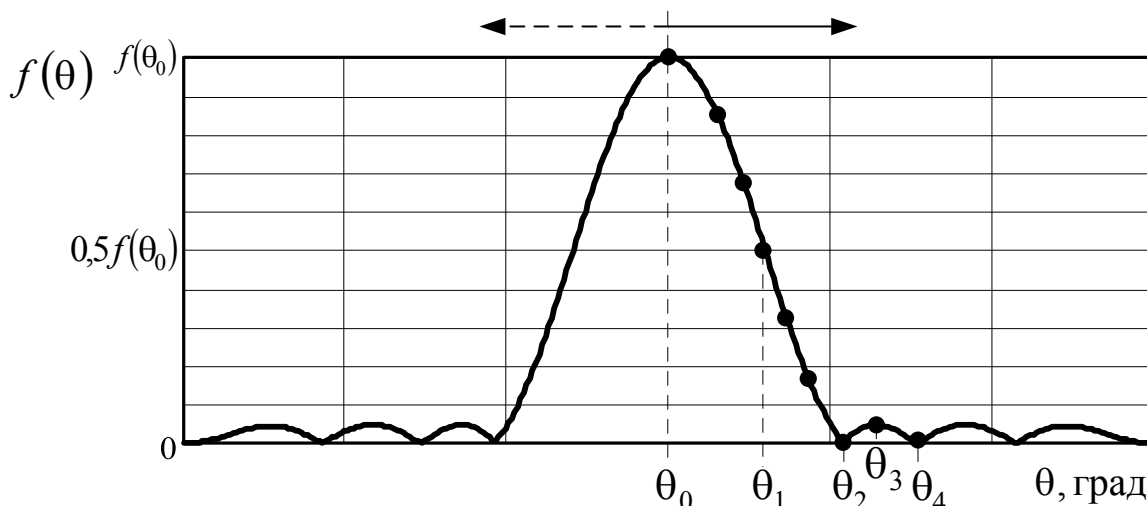


Рисунок 3.8 — Методика измерения диаграммы направленности зеркальной антенны

— на интервалах углов $\theta \in (\theta_0, \theta_1)$ и $\theta \in (\theta_1, \theta_2)$ **произвести измерение ДН антенны в двух дополнительных точках на каждом из интервалов**;

— повернуть антенну на угол $\theta > \theta_2$ и определить направления, соответствующие первому боковому максимуму $f(\theta_3)$ и следующему минимуму ДН $f(\theta_4)$;

— повернуть антенну в исходное положение, соответствующее углу θ_0 ;

— повторить аналогичный порядок измерений при вращении антенны **против часовой стрелки**.

е) Провести измерения ДН зеркальной антенны в E -плоскости. Для этого, согласно рис. 3.6, б, повернуть исследуемую и вспомогательную антенны на 90° вокруг оси s_1 и повторить измерения ДН аналогично п. д).

ж) Измерить коэффициент усиления антенны:

— установить на опорно-поворотном устройстве **вместо** исследуемой антенны эталонную рупорную антенну;

— выполнить операции по пп. в), г);

— записать измеренное значение $f_3(\theta_0)$.

з) Установить на опорно-поворотное устройство вторую исследуемую параболическую зеркальную антенну и выставить на генераторе частоту,

соответствующую исходным данным для этой антенны.

и) Выполнить операции по пп. в) — ж).

2.3.3. Обработка результатов измерений

а) Для измерений ДН первой исследуемой зеркальной антенны, выполненных в H -плоскости:

— с использованием формул (3.16), (3.17) пересчитать значения всех углов относительно значения угла θ_0 (см. табл. 3.7, две верхние строки);

— пронормировать и перевести в децибелы измеренные значения показаний микровольтметра по формуле

$$F(\theta) = 10 \lg \left(\frac{f(\theta)}{f(\theta_0)} \right);$$

— все результаты пересчетов занести в таблицу.

Таблица 3.7 — Пример заполнения таблицы с результатами измерений в одной плоскости

	θ_0								
Отсчет, град	80	85	90	95	100	105	110	115	120
θ , град	−40	−35	−30	−25	−20	−15	−10	−5	0
$f(\theta)$	0,1	5	0,1	20	35	50	65	80	100
$F(\theta)$, дБ	−30	−13	−30	−7	−4,6	−3	−1,8	−1	0

	θ_0								
Отсчет, град	120	125	130	135	140	145	150	155	160
θ , град	0	5	10	15	20	25	30	35	40
$f(\theta)$	100	83	60	50	30	15	0,5	7	0,5
$F(\theta)$, дБ	0	−0,8	−2,2	−3	−5,2	−8,2	−23	−11	−23

б) Для измерений ДН первой исследуемой зеркальной антенны, выполненных в E -плоскости, заполнить таблицу в порядке, аналогичном пп. а).

в) Для второй исследуемой антенны обработать результаты измерений диаграмм направленности аналогично п. а), б).

г) Для первой исследуемой антенны построить в одной декартовой системе координат графики для экспериментально измеренных диаграмм направленности в E - и H -плоскостях в децибелах ($F(\theta)$, дБ). Выполнить аналогичные построения для второй исследуемой антенны.

д) По экспериментальным диаграммам направленности определить для двух антенн ширину главного лепестка $2\Delta\theta_{-3\text{дБ}}^E$ и $2\Delta\theta_{-3\text{дБ}}^H$ и уровни первых боковых лепестков.

е) Рассчитать коэффициенты усиления для первой антенны:

— заполнить верхнюю строку табл. 3.8 (результаты измерений в

направлении максимального излучения для исследуемой антенны $f(\theta_0)$ (взять из заполненной табл. 3.7) и эталонной антенны $f_{\text{э}}(\theta_0)$);

Таблица 3.8 — Пример заполнения таблицы с результатами расчета коэффициента усиления зеркальной антенны для частоты 10 ГГц (антенна 1) и 9 ГГц (антенна 2)

$f(\theta)$	Антенна 1		Антенна 2	
	$f(\theta_0)$	$f_{\text{э}}(\theta_0)$	$f(\theta_0)$	$f_{\text{э}}(\theta_0)$
	250	120	190	105
$G_{\text{э}}, \text{дБ}$	17,2		16	
$G, \text{дБ}$	20,4		19,8	

— по графику на рис. 3.9 для частоты, на которой проводились измерения, определить значение коэффициента усиления эталонной антенны $G_{\text{э}}, \text{дБ}$; найденное значение записать в табл. 3.8;

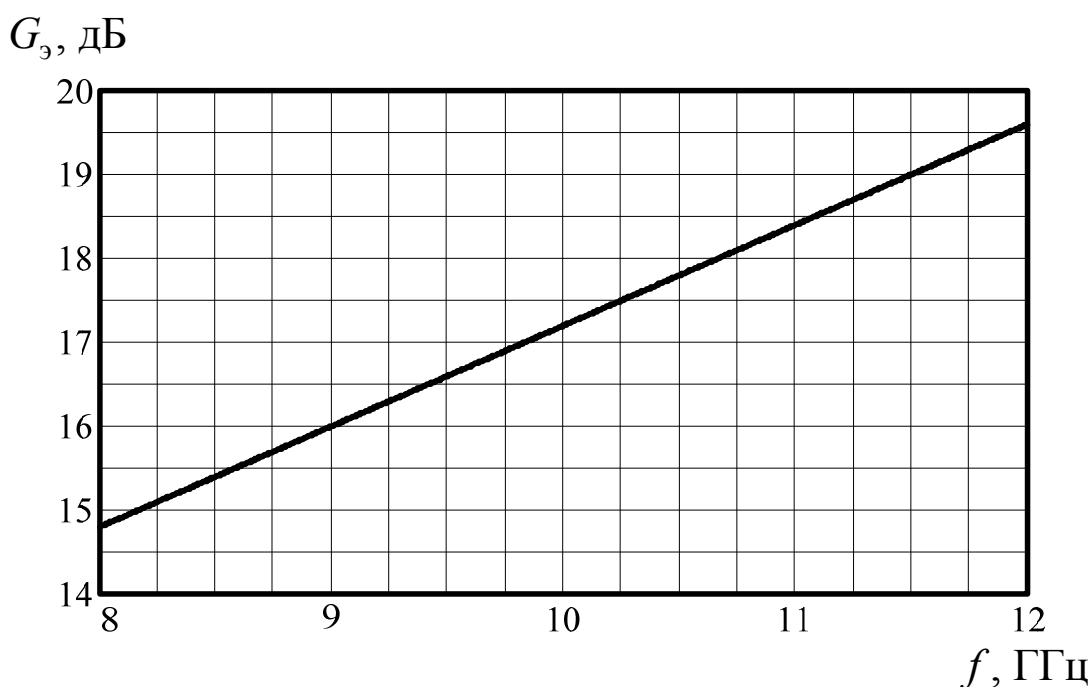


Рисунок 1.4 — Зависимость коэффициента усиления эталонного рупора от частоты

— рассчитать значение коэффициента усиления антенны по формуле:

$$G = G_{\text{э}} + 10 \lg \frac{f(\theta_0)}{f_{\text{э}}(\theta_0)};$$

— полученное значение коэффициента усиления антенны занести в табл. 3.8.

ж) Рассчитать коэффициенты усиления для второй антенны аналогично п. е).

з) Сравнить результаты теоретического и экспериментального

исследований.

и) Сделать выводы по работе.

2.6. Контрольные вопросы и задания

2.6.1. Вопросы для допуска к лабораторной работе

а) Опишите состав установки для измерения внешних характеристик параболической зеркальной антенны.

б) Опишите, что входит в программу экспериментальных исследований данной лабораторной работы.

в) Опишите методику измерения диаграммы направленности зеркальной антенны.

г) Опишите методику измерения коэффициента усиления зеркальной антенны.

д) Определите для макетов исследуемых антенн положение E - и H -плоскости.

е) Определите для вспомогательной рупорной антенны положение E - и H -плоскости.

3.6.2. Задания для подготовки к защите лабораторной работы

а) Параболическая антенна с осесимметричным отражателем диаметром $d_3 = 4,5$ м возбуждается полуволновым вибратором с дисковым рефлектором и работает на длине волны $\lambda = 0,2$ м. Определить оптимальное фокусное расстояние зеркала, угол его раскрыва и электрические размеры облучателя.

б) Пирамидальный рупор, возбуждаемый волной H_{10} , имеет квадратный раскрыв и используется в качестве облучателя параболической антенны с осесимметричным зеркалом. В какой из плоскостей (H или E) ширина главного луча ДН антенны на уровне половинной мощности больше и почему?

в) Антенна самолетного радиолокатора, работающего на длине волны $\lambda = 0,03$ м, выполнена в виде усеченного параболоида с размерами $a_3 \times b_3 = 1 \times 1,5$ м. Определить ширину главного луча ДН антенны на уровне половинной мощности в H - и E -плоскостях, если уровень бокового излучения не превышает -22 дБ.

г) Определить размеры раскрыва отражателя параболической антенны в виде усеченного параболоида, при которых ее нормированная амплитудная диаграмма направленности будет иметь ширину главного луча ДН по уровню половинной мощности $2\theta_{0,5}^E = 7^\circ$ и $2\theta_{0,5}^H = 1^\circ$, если длина рабочей волны $\lambda = 0,03$ м и уровень бокового излучения не превышает $-20,5$ дБ.

д) Определить диаметр раскрыва и фокусное расстояние параболической антенны с осесимметричным зеркалом, ширина луча

которой на уровне половинной мощности в H -плоскости $2\theta_{0,5}^H = 3^\circ$ и уровень бокового излучения не превышает -23 дБ. Длина волны $\lambda = 0,032$ м, а угол раскрыва параболического зеркала $\Psi_0 = 49^\circ$.

е) Определить допуски на установку облучателя для параболического зеркала со следующими геометрическими параметрами: размер раскрыва $a_3 \times b_3 = 0,5 \times 1$ м, фокусное расстояние $f_3 = 0,5$ м. Рабочая частота 11 ГГц.

ж) Рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную амплитудную ДН параболической антенны с осесимметричным отражателем диаметром $d_3 = 1,2$ м на частоте 9,8 ГГц. Требуется обеспечить уровень бокового излучения не более -18 дБ.

з) Рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную амплитудную ДН параболической антенны с осесимметричным отражателем диаметром $d_3 = 1,5$ м на частоте 8,5 ГГц. Требуется обеспечить уровень бокового излучения не более -20 дБ.

и) Рассчитать и построить в прямоугольных координатах нормированную амплитудную ДН параболической антенны с осесимметричным отражателем диаметром $d_3 = 1$ м на частоте 10,5 ГГц. Требуется обеспечить уровень бокового излучения не более -22 дБ.

к) Опишите особенности конструкции классической параболической зеркальной антенны.

л) Опишите конструкцию, принцип действия и характеристики облучателя Катлера, используемого в конструкции исследуемых зеркальных антенн.

м) Какие требования предъявляются к облучателям зеркальных антенн?

н) Перечислите основные внешние характеристики зеркальных антенн.

о) Поясните, на что влияют погрешности при установке облучателя в параболической зеркальной антенне?

п) Поясните, как изменится диаграмма направленности зеркальной антенны, если увеличится площадь апертуры антенны при неизменном распределении поля в раскрыве.

р) Поясните, как изменится диаграмма направленности зеркальной антенны при неизменных значениях площади и формы раскрыва, если спадающее распределение поля в апертуре будет характеризоваться пьедесталом (относительная амплитуда поля на краю апертуры), изменившимся от 0,5 до 0,1.

с) Сравните диаграммы направленности зеркальных антенн, которые при одинаковых распределениях поля в раскрыве отличаются формой апертуры: одно зеркало имеет круглый раскрыв, второе зеркало — усеченный в E -плоскости раскрыв.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оформление текстовых работ: методические указания / СевГУ; сост. В. Г. Слёзкин, П. П. Ермолов. — Севастополь : Изд-во СевГУ, 2015. — 19 с.
2. Хмель В.Ф. Теория и расчет антенн и устройств сверхвысоких частот. Сборник задач: Учеб. Пособие / Хмель В.Ф. и др. — Одесса: Латстар, 2001. — 252 с.
3. Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны / Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев. — М.: Радиотехника, 2006. — 376 с.
4. Марков Г.Т. Антенны/ Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. — М.: Энергия, 1975. — 523 с.
5. Айзенберг Г.З. Коротковолновые антенны / Г.З. Айзенберг, С.П. Белоусов, Э.М. Журбенко; Под ред. Г.З. Айзенберга. — М.: Радио и связь, 1985. — 536 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА ОТЧЕТА
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Институт радиоэлектроники и информационной безопасности
Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
«ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
РУПОРНЫХ АНТЕНН»
по дисциплине «Устройства СВЧ и антенны»

Выполнил студент _____
фамилия и инициалы

Группа _____

Отчет защищён с оценкой _____

Преподаватель _____

Севастополь

20__ г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ПРИМЕР НАПИСАНИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ ПАКЕТЕ *MATHCAD 7.0*

Длина волны, м $\lambda := \frac{3 \cdot 10^8}{\text{freq}} = 0.032$

Волновое число $k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$

Диаметры апертуры зеркала, м $dz1 := 0.3 \quad dz2 := 0.3$

Фокусное расстояние зеркала, м $fz := 0.122$

Параметры облучателя зеркала, м $dk := 0.015 \quad lk := 0.02$

Связь угловой и декартовой координат $\psi(r) := \arccos \left[\frac{1 - \left(\frac{r}{2 \cdot fz} \right)^2}{1 + \left(\frac{r}{2 \cdot fz} \right)^2} \right]$

Диаграмма направленности облучателя зеркала

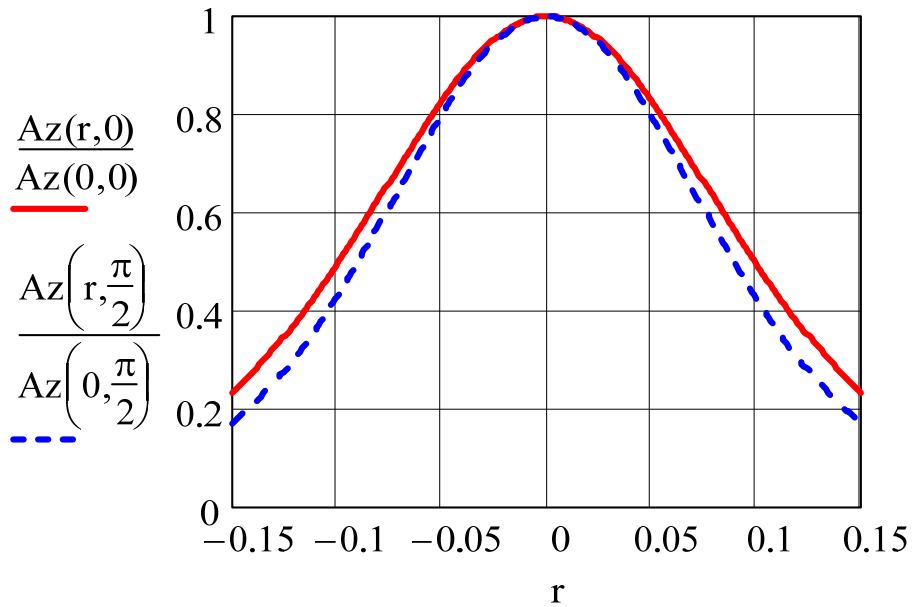
$$ff(r, \alpha) := \sqrt{\cos \left(k \cdot \frac{dk}{2} \cdot \sin(\psi(r)) \right)^2 \cdot \sin(\alpha)^2 + \left(\frac{\cos \left(k \cdot \frac{lk}{2} \cdot \sin(\psi(r)) \right) - \cos \left(k \cdot \frac{lk}{2} \right)}{\cos(\psi(r))} \right)^2 \cdot \cos(\alpha)^2}$$

Распределение поля в раскрыве зеркала

$$Az(r, \alpha) := ff(r, \alpha) \cdot \frac{1 + \cos(\psi(r))}{2 \cdot fz}$$

$$r := -\frac{dz1}{2}, -\frac{dz1}{2} + 0.001.. \frac{dz1}{2}$$

Распределение поля в раскрыве зеркала



Результирующая диаграмма направленности зеркальной антенны

$$f_{\text{ref}}(\theta, \phi) := (1 + \cos(\phi)) \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{\sqrt{\left(\frac{dz1}{2}\right)^2 \sin^2(\alpha) + \left(\frac{dz2}{2}\right)^2 \cos^2(\alpha)}} \left[\frac{Az(r, \alpha)}{Az(0, \alpha)} \cdot \exp(1j \cdot k \cdot r \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi - \alpha)) \cdot r \right] dr d\alpha$$

Диаграмма направленности в E -плоскости

$$Fe_{\text{ref}}(\theta) := 20 \cdot \log \left(\left| \frac{f_{\text{ref}}\left(\theta, \frac{\pi}{2}\right)}{f_{\text{ref}}\left(0, \frac{\pi}{2}\right)} \right| \right)$$

Диаграмма направленности в H -плоскости

$$Fh_{\text{ref}}(\theta) := 20 \cdot \log \left(\left| \frac{f_{\text{ref}}(\theta, 0)}{f_{\text{ref}}(0, 0)} \right| \right)$$

Диапазон углов для расчета ДН

$$\theta := -40 \cdot \frac{\pi}{180}, -40 \cdot \frac{\pi}{180} + 0.01 \dots 40 \cdot \frac{\pi}{180}$$

Диаграмма направленности зеркальной антенны в E -плоскости

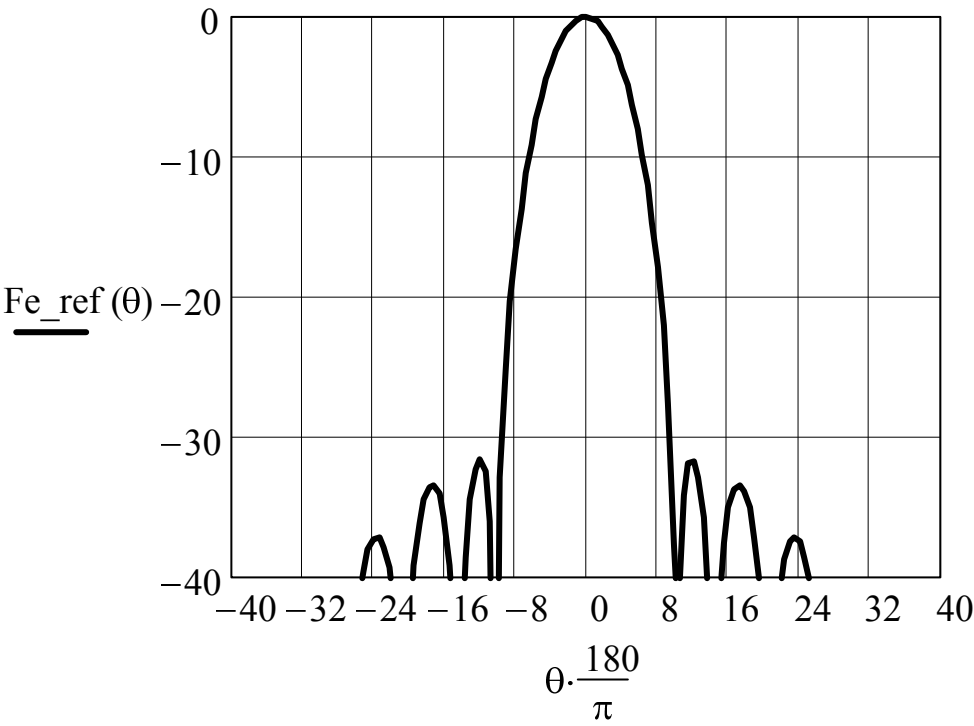


Диаграмма направленности зеркальной антенны в H -плоскости

