

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**«МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ»**  
Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина

## **КУРСОВАЯ РАБОТА**

по курсу

*«Спецразделы антенно-фидерных устройств»*

*Вариант 17*

Проектирование приёмной АФАР

Выполнил: *Лазба Филипп Борисович*  
*студент группы РТ-42*  
Руководитель: *Чистюхин В.В.*

Москва  
2021

# Оглавление

<b>1</b>	<b>Техническое задание</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Расчёт параметров</b>	<b>4</b>
2.1	Расчёт относительного уменьшения возбуждения на краю антенны . . . . .	4
2.2	Расчёт межэлементного расстояния . . . . .	4
2.3	Расчёт количества элементов . . . . .	4
2.4	Выбор схемы разводки и расчёт энергетического потенциала АФАР . . . . .	5
2.5	Расчёт точности выставки луча . . . . .	7
2.6	Выбор и расчёт элементарного излучателя . . . . .	7
	<b>Список источников</b>	<b>9</b>
	<b>Приложение А: Моделирование излучателя</b>	<b>10</b>
	<b>Приложение В: Моделирование антенной решётки</b>	<b>11</b>

# Техническое задание

Спроектировать приёмную АФАР с заданными параметрами:

Коэффициент усиления .....	$K_p = 15\text{дБ}$
Коэффициент шума .....	$K_{\text{ш}} = 3.2\text{дБ}$
Количество разрядов фазовращателя .....	$p = 3$
Длина волны .....	$\lambda = 5\text{см}$
Угол сканирования .....	$\theta_{\text{ск}} = \pm 18^\circ$
Ширина луча по уровню 0.5 оХ .....	$\theta_{X0.5} = 3^\circ$
Ширина луча по уровню 0.5 оУ .....	$\theta_{Y0.5} = 4^\circ$
Уровень боковых лепестков .....	$t \leq -19\text{дБ}$

Рассчитать:

- Энергетический потенциал  $\Pi_{\text{ПРМ}}$
- Количество элементов  $N$
- Межэлементное расстояние  $d$
- Ошибку наведения луча  $\delta\theta_x, \delta\theta_y$
- Параметр относительного уменьшения возбуждения на краю антенны  $\Delta$

# Расчёт параметров

## Расчёт относительного уменьшения возбуждения на краю антенны

Для обеспечения требуемого УБЛ используем распределение со спадающей к краям амплитудой вида косинус на пьедестале.  $t \approx -(13 + 13\Delta + 22\Delta^2)$  Решив квадратное уравнение получим  $\Delta = 0.3$ .

## Расчёт межэлементного расстояния

Для углов  $\theta_{\text{ск}} \leq 45^\circ$  можно применять «мягкую» формулу:

$d \leq \frac{\lambda}{\sin\theta_{\text{д}} + \sin\theta_{\text{ск}}}$ , где  $\theta_{\text{д}}$  – направление дифракционного максимума, которое мы найдём,

воспользовавшись формулой для аппроксимации ДН элемента:

$$f(\theta) = \cos^a(\theta)$$

$$\cos^{2\alpha}\theta_{\text{ск}} = 1/2$$

$$\alpha = 0.5 \cdot \frac{\log 0.5}{\log(\cos(18^\circ))} = 6.91$$

$$\cos^{2\alpha}\theta_{\text{д}} = t = 0.013$$

$$\theta_{\text{д}} = \arccos(\sqrt[2\alpha]{t_{\text{ед}}}) = 43.24$$

Отсюда  $d = 5.03$  см

## Расчёт количества элементов

Из формулы для вычисления количества элементов по заданным  $\Delta\theta_{0.5}$  и  $\Delta$  найдём  $N_1$  и  $N_2$  – число элементов на каждой стороне антенны.

$$N_1 = \frac{(1 + 0.636 \cdot \Delta^2) \cdot 51^\circ \cdot \lambda}{\theta_{0.5x} \cdot d} = 18$$

$$N_2 = \frac{(1 + 0.636 \cdot \Delta^2) \cdot 51^\circ \cdot \lambda}{\theta_{0.5y} \cdot d} = 14$$

Линейный размер решётки равен  $N_i \cdot d$ , отсюда длина и ширина решетки

$$L = 90.5 \text{ см} \quad W = 70.4 \text{ см}$$

Общее число элементов  $N = N_1 \cdot N_2 = 252$

# Выбор схемы разводки и расчёт энергетического потенциала АФАР

## Одноэтажная схема

Рассмотрим одноэтажную схему разводки ( Рис. 2.1 ). Используем сумматор на 256. Неиспользуемые входы сумматора включим на согласованную нагрузку.

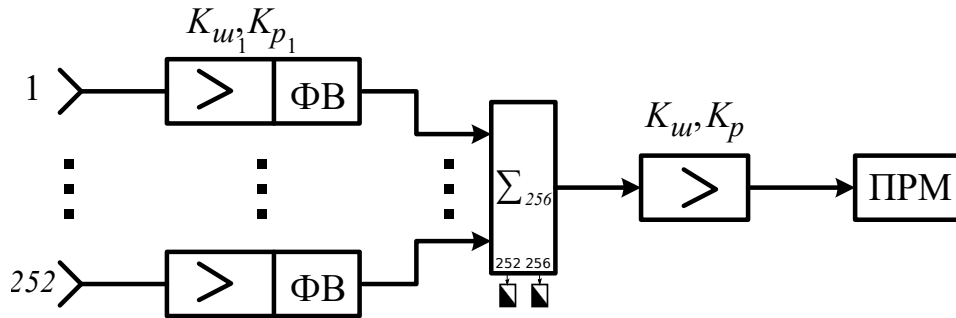


Рис. 2.1: Одноэтажная схема разводки

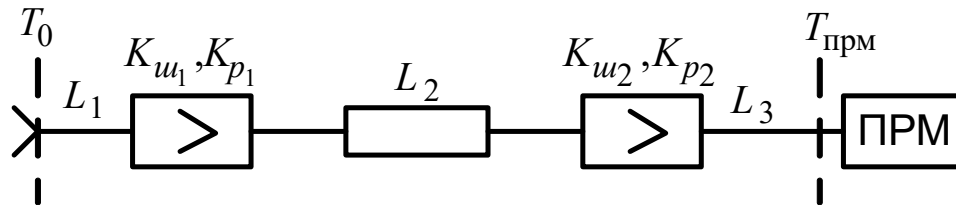


Рис. 2.2: Схема прохождения сигнала по одному каналу

Условимся, что

Погонные потери в соединительных кабелях (до МШУ) .....	1 дБ/м
Потери на ФВ .....	3 дБ
Омические потери в одном сумматоре $L_{1\Sigma}$ .....	0.5 дБ
Потери в соединительных кабелях .....	1 дБ
Потери в соединительном кабеле между АФАР и ПРМ .....	0.5 дБ

Найдём потери в кабеле как  $L_{\text{каб}} = l_{\text{каб}} \cdot \sqrt{L^2 + W^2}/2 = 0.6$  дБ

Возьмём потери в кабеле и фильтре МШУ  $L_1 = 0.8$  дБ = 1.2

$L_2 = L_{\text{ФВ}} + L_{\text{фид}} + L_{1\Sigma} \cdot N_3 = 1 + 3 + 0.5 \cdot 8 = 8$  дБ = 6.3

$L_3 = 0.5$  дБ = 1.1

$L_{\Sigma} = L_1 + L_2 + L_3 = 8.77$  дБ = 7.5

Рассчитаем  $K_{\text{ш}\Sigma}$

$$K_{\text{ш}\Sigma} = K_{\text{ш}}L_1 + \frac{(L_2 - 1)L_1}{K_p} + \frac{(K_{\text{ш}} - 1)L_1L_2}{K_p} + \frac{(L_3 - 1)L_1L_2}{K_p^2} + \frac{L_1L_2L_3}{K_p^2} =$$

$$= 2.5 + 0.2 + 0.26 + 0.0009 + 0.0085 = 2.97 \text{ дБ}$$

Отношение остальных слагаемых к первому около 18.8

Проверим  $\frac{L_{\Sigma}}{K_p} \leq 0.1 \div 0.5$

$$\frac{L_{\Sigma}}{K_p} = 7.5/32 = 0.24$$

### Двухэтажная схема

Целесообразно применить активную разводку с двухэтажной схемой ( Рис. 2.3 ). Исходя из соображений баланса экономических затрат и коэффициента шума разбиваем решетку на 32 подрешетки по 8 элементов.

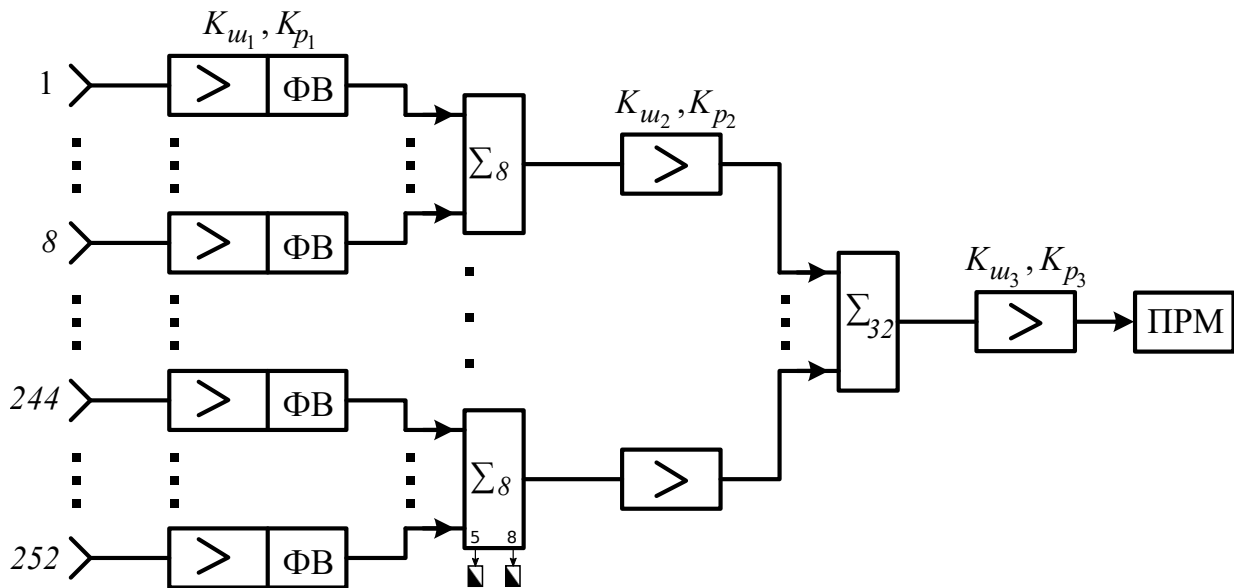


Рис. 2.3: Двухэтажная схема разводки

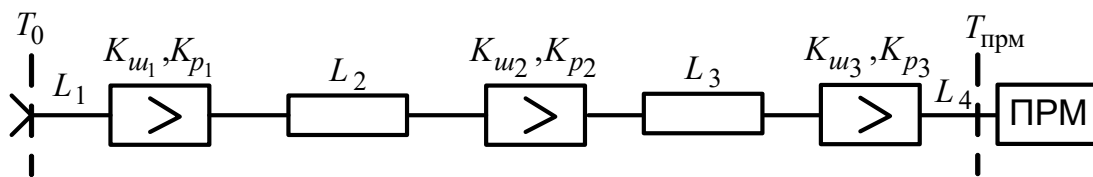


Рис. 2.4: Схема прохождения сигнала по одному каналу

На Рис. 2.4

$L_1$  – потери в соединительном кабеле между излучателем и МШУ, а так же потери во входном фильтре.  $L_1 = 0.8 \text{ дБ} = 1.2$

$L_2$  – потери в ФВ, первых сумматорах и соединительных кабелях.

$$L_2 = L_{\text{ФВ}} + L_{\text{фид}} + L_{1\Sigma} \cdot N_3 = 1 + 3 + 0.5 \cdot 3 = 5.5 \text{ дБ} = 3.6$$

$L_3$  – потери в остальных сумматорах и соединительных кабелях.

$$L_3 = L_{\text{фид}} + L_{1\Sigma} \cdot N_{32} = 1 + 0.5 \cdot 5 = 3.5 \text{ дБ} = 2.2$$

$L_4$  – потери в соединительном кабеле между МШУ и ПРМ.  $L_4 = 0.5 \text{ дБ} = 1.1$

Для такой схемы коэффициент шума рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{\text{ш}\Sigma} = K_{\text{ш}}L_1 + \frac{(L_2 - 1)L_1}{K_p} + \frac{(K_{\text{ш}} - 1)L_1L_2}{K_p} + \frac{(L_3 - 1)L_1L_2}{K_p^2} + \frac{(K_{\text{ш}} - 1)L_1L_2L_3}{K_p^2} + \\ + \frac{(L_4 - 1)L_1L_2L_3}{K_p^2} + \frac{L_1L_2L_3L_4}{K_p^3} = 2.4966 + 0.0963 + 0.1460 + 0.0053 + 0.0103 = 2.75$$

Отношение остальных слагаемых к первому около 10.3

Проверим  $\frac{L_{\Sigma}}{K_p} \leq 0.1 \div 0.5$

$$\frac{L_{\Sigma}}{K_p} = 4.7/32 = 0.12$$

Необходимость перехода к 3этажной схеме отсутствует.

## Расчёт энергетического потенциала АФАР

$$P_{\text{ПРМ}} = \frac{S_{\text{эфф}}}{T_{\text{эфф}}}$$

$$S_{\text{эфф}} = A \cdot S_1 \cdot \sigma = A \cdot L \cdot W \cdot \sigma = 0.5 \cdot 90.5 \cdot 70.4 \cdot 0.7 = 2232$$

$$T_{\text{эфф}} = T_0 \cdot (K_{\text{ш}\Sigma} - 1) = 290 \cdot (2.755 - 1) = 509$$

$$P_{\text{ПРМ}} = 2232/509 = 4.39 \text{ (см}^2/\text{K)}$$

## Расчёт точности выставки луча

Ошибка наведения луча АР в данной плоскости может быть рассчитана по формуле:

$$\delta\theta = \frac{9 \cdot \Delta\theta_{0.5}}{N \cdot 2^p}$$

$$\delta\theta_x = 0.19^\circ = 11'24''$$

$$\delta\theta_y = 0.32^\circ = 19'12''$$

## Выбор и расчёт элементарного излучателя

Ввиду симметричности по осям и малых размеров угла сканирования ( $\theta_{\text{ск}} = \pm 18^\circ$ ) целесообразно применение в качестве излучателя спиральной антенны. Схема построения спиральной антенны показана на Рис 2.5.

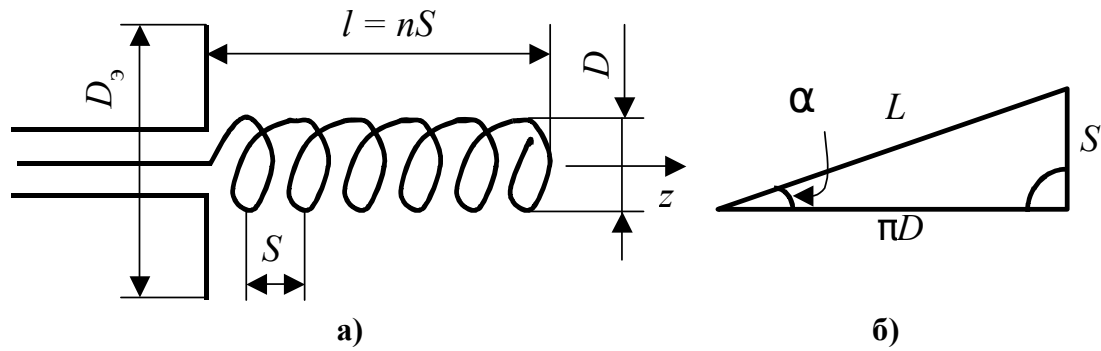


Рис. 2.5: Цилиндрическая спиральная антенна (а) и развертка ее витка (б)

Экраном может служить металлическая поверхность АР. Выберем оптимальный режим - режим осевого излучения. При этом режиме  $L = \lambda$  и угол намотки  $\alpha = 12^\circ$ .

Для углов  $\alpha = 12 \div 17^\circ$  применима следующая формула вычисления параметров:

$$\Delta\theta_{0.5} = 2\theta_{\text{ск}} = \frac{52^\circ \cdot \lambda}{L} \sqrt{\frac{\lambda}{l}}$$

$$\text{Получаем } l = \frac{52^2 \lambda}{4\theta_{\text{ск}}^2} = \frac{2704 \cdot 5}{4 \cdot 324} = 10.43 \text{ см}$$

$$\text{Шаг намотки } S = L \cdot \sin\alpha = 5 \cdot \sin 12^\circ = 1.04 \text{ см}$$

$$\text{Диаметр намотки } D = \frac{L \cdot \cos\alpha}{\pi} = 1.56 \text{ см}$$

$$\text{Количество витков } n = l/S = 10.04 \text{ витков}$$

$$\text{Волновое сопротивление излучателя: } Z_{\text{вх}} = \frac{140 \cdot L}{\lambda} = 140 \text{ Ом}$$



## Список источников

1. *В.В. Чистюхин, К.С. Лялин.* Проектирование антенно-фидерных устройств : Методические указания к практическим занятиям по курсу “Антенно-фидерные устройства”. — М. : МИЭТ, 2001. — С. 116.
2. *В.В. Чистюхин, К.С. Лялин.* Практические занятия по курсу “Антенно-фидерные устройства”. — М. : МИЭТ, 2010. — С. 112.
3. *В.В. Чистюхин.* Антенно-фидерные устройства: Учебное пособие. — М. : МИЭТ, 2010. — С. 178.
4. *Д.М. Сазонов.* Антенны и устройства СВЧ. — М. : Высшая школа, 1988. — С. 434.
5. *Д.В. Приходько.* Лабораторные работы по курсу «Проектирование Антенно-Фидерных устройств». — 2021. — URL: <https://github.com/dee3mon/>.
6. *Ф.Лазба.* Репозиторий курсового проекта / GitHub. — 2021. — URL: <https://github.com/lazbaphilipp/AFD-coursework>.

## Приложение А: Моделирование излучателя

Рассчитаем антенну с помощью Keysight EmPRO. Диаграмму направленности в плоскостях X,Y можно увидеть на Рис. A.1.

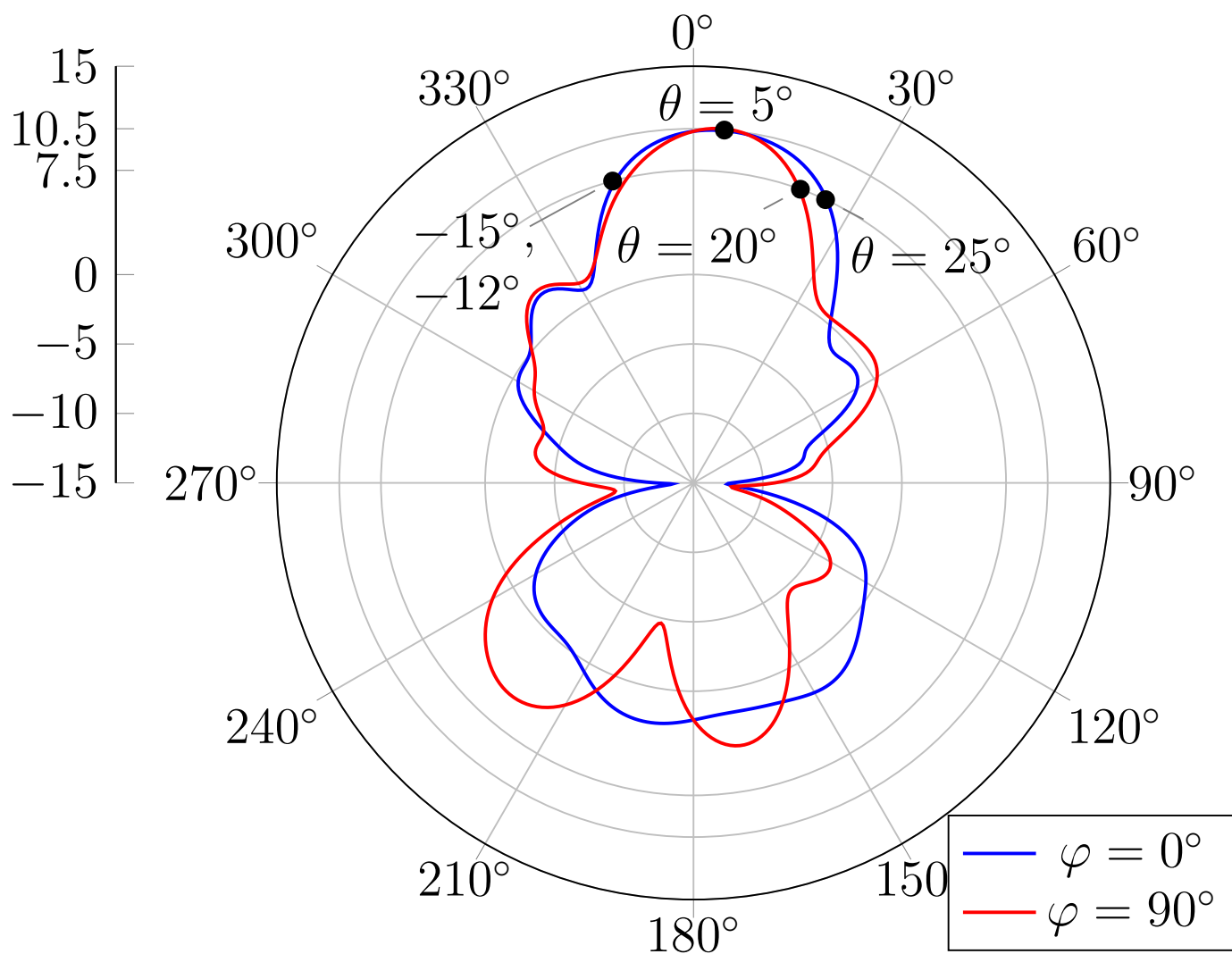


Рис. А.1: Диаграмма направленности расчётной антенны

По графику видно, что отклонение главного луча составило  $5^\circ$  и ширина луча по оХ и оУ равна соответственно  $40^\circ$  и  $32^\circ$ , что соотносится с требованием  $\theta_{\text{ск}} = \pm 18^\circ$  из ТЗ.

## Приложение В: Моделирование антенной решётки

Перенесём данные в MATLAB и проведём дополнительные расчёты. На Рис. В.1 и В.2 показаны ДН для плоскостей  $oXZ$  и  $oYZ$  ( $\varphi_{x,y} = 0, 90^\circ$ ) для углов  $\theta_0 = -18^\circ, 0^\circ, 18^\circ$ . Для наглядности на них приведены ДН излучателя, нормированные к  $K_y$  системы.

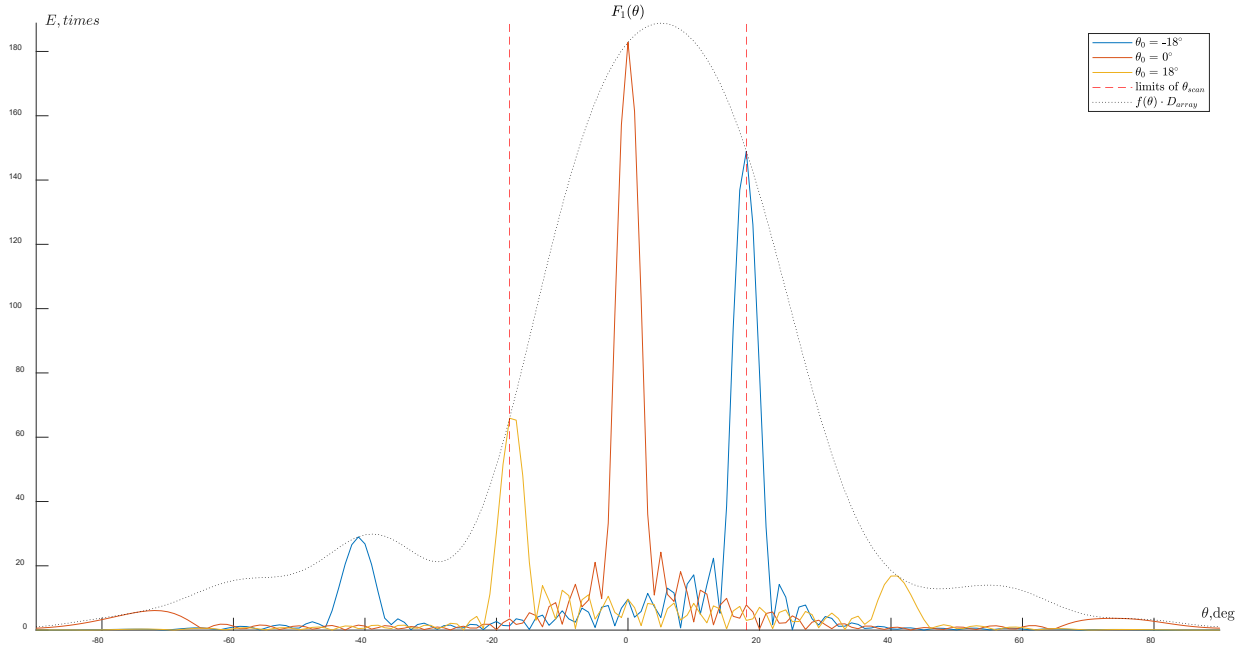


Рис. В.1: ДН системы в плоскости  $oXZ$

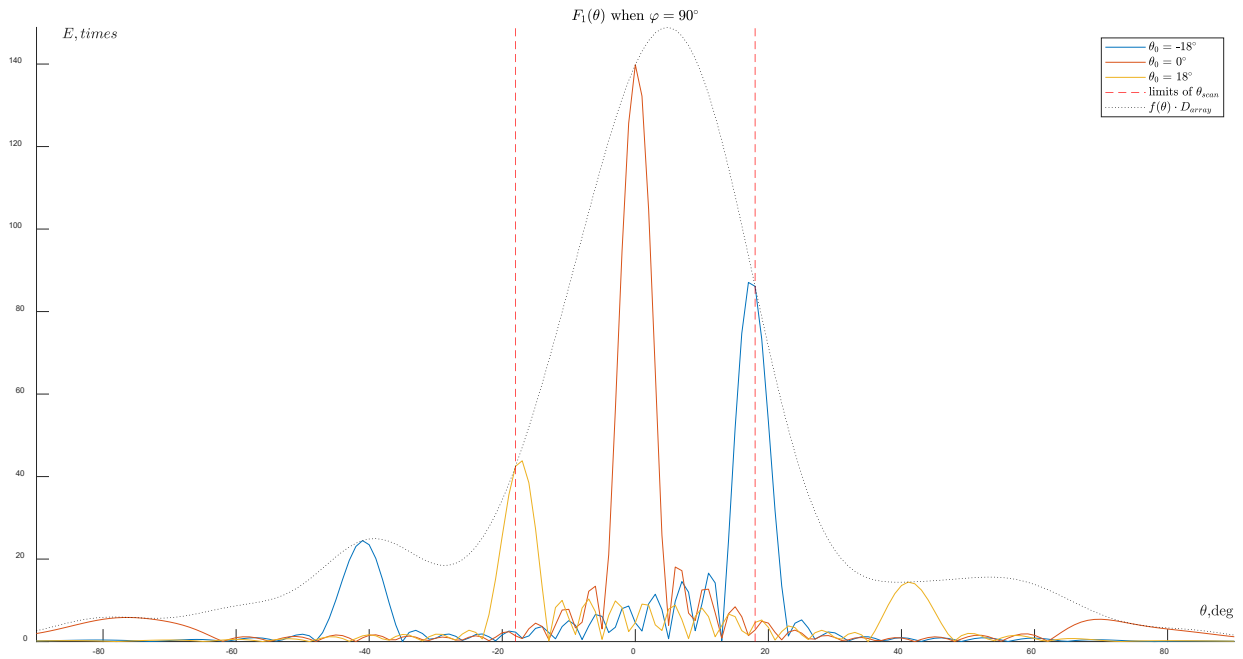


Рис. В.2: ДН системы в плоскости  $oYZ$