

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

1	Техническое задание	3
2	Расчёт параметров	4
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
	Список источников	9
	Приложение А: Моделирование излучателя	10
	Приложение В: Моделирование антенной решётки	11

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 Δ

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 Δ 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.

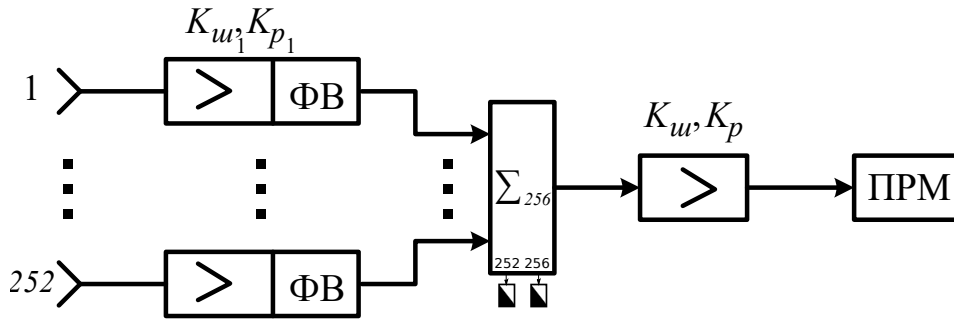


Рис. 2.1: Одноэтажная схема разводки

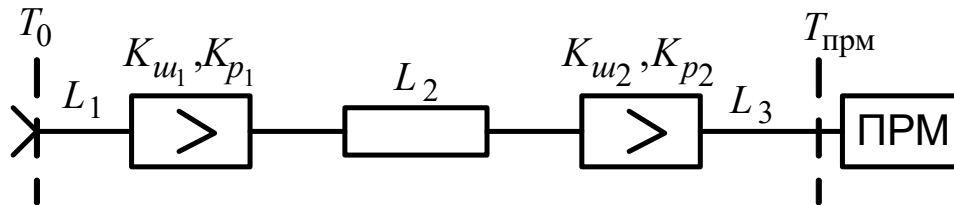


Рис. 2.2: Схема прохождения сигнала по одному каналу

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 $K_{\text{ш}\Sigma}$

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

$$= 2.5 + 0.2 + 0.26 + 0.0009 + 0.0085 = 2.97$$

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.

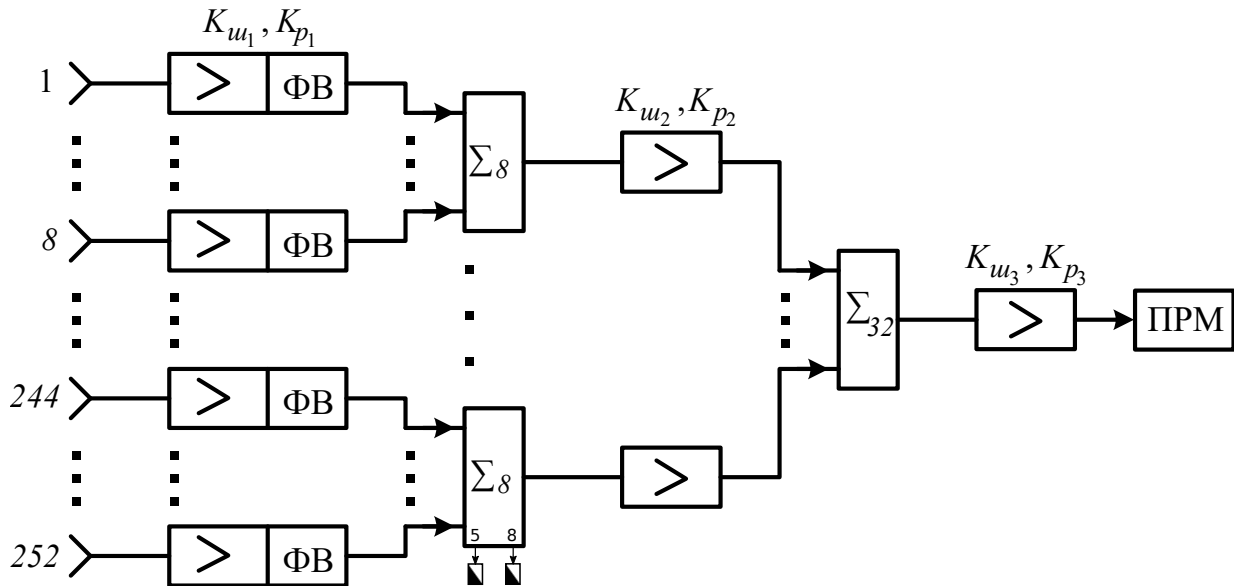


Рис. 2.3: Двухэтажная схема разводки

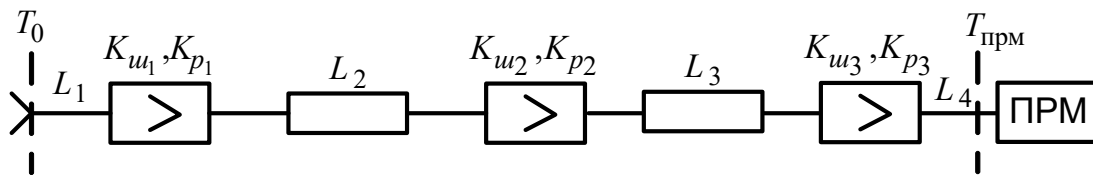


Рис. 2.4: Схема прохождения сигнала по одному каналу

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:

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

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

$$П_{ПРМ} = \frac{S_{эфф}}{T_{эфф}}$$

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

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

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

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 ($\theta_{ск} = \pm 18 : \circ$) целесообразно применение в качестве излучателя спиральной антенны. Схема построения спиральной антенны показана на Рис [2.5](#).

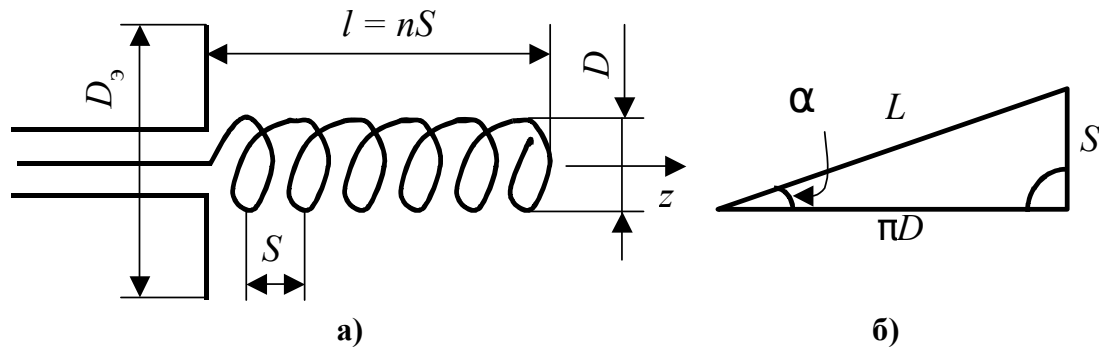


Рис. 2.5: Цилиндрическая спиральная антенна (а) и развертка ее витка (б)

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:

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

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

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

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

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

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

Исходные файлы и скрипты для расчёта можно найти в репозитории проекта.

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.

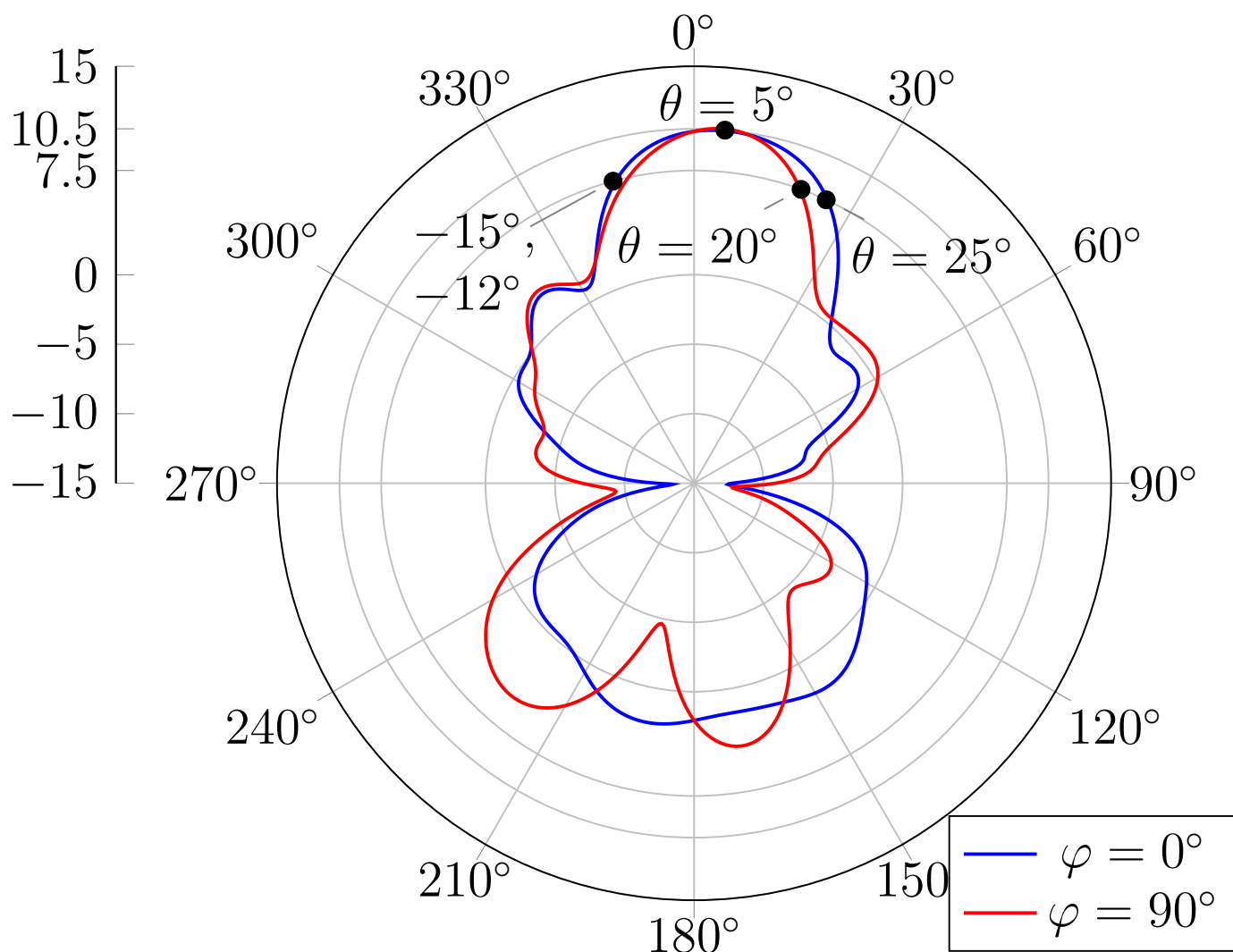


Рис. А.1: Диаграмма направленности расчётной антенны

По графику видно, что отклонение главного луча составило 5° и ширина луча по oX и oY равна соответственно 40° и 32° , что соотносится с требованием $\theta_{\text{ск}} = \pm 18^\circ$ из ТЗ, однако заднее излучение слишком сильное, что говорит о том, что при моделировании был выбран недостаточный экран.

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.

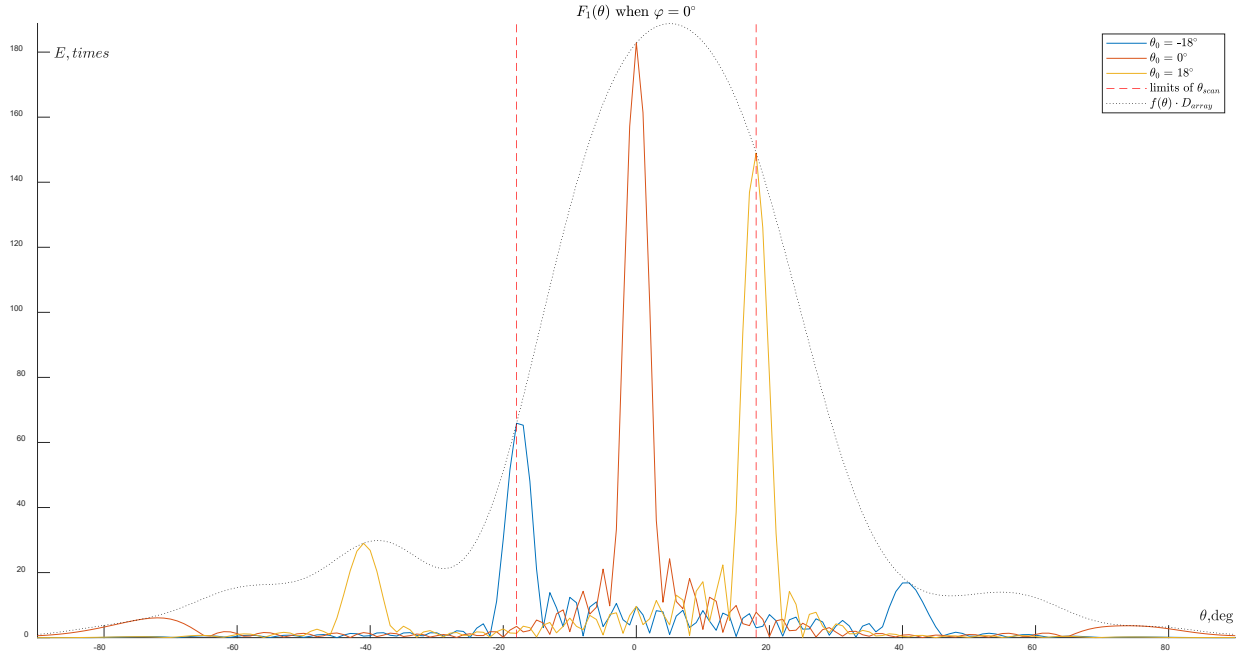


Рис. В.1: ДН системы в плоскости oXZ

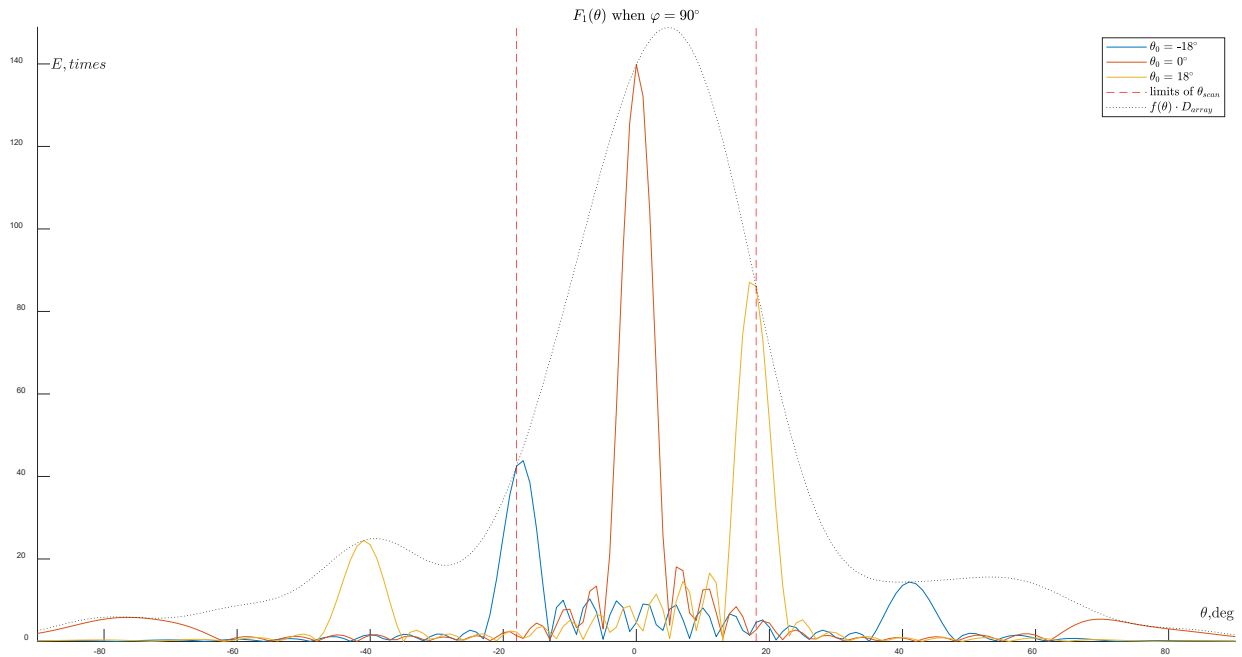


Рис. В.2: ДН системы в плоскости oYZ