

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

---

И.В. КОРОГОДИН

**ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ**

**Лабораторная работа №2**

Методическое пособие по курсу  
«Математическое моделирование радиотехнических устройств и систем»

для студентов, обучающихся по направлению «Радиотехника»

УДК 621.396

К 001

*Утверждено учебным управлением МЭИ*

*Подготовлено на кафедре радиотехнических систем*

Рецензент: проф., д.т.н. А.И. Перов

**Корогодин И.В.**

К001        Диаграмма направленности антенной решетки. Лабораторная работа №2: методическое пособие / И.В. Корогодин – М.: Издательство МЭИ, 2014. – 31 с.

В лабораторной работе изучается метод комплексных амплитуд в приложении моделирования радиотехнических устройств на примере построения диаграммы направленности многоэлементной антенной системы. В рамках лабораторной работы студенты осваивают создание и использование собственных функций, отображение поверхности функций нескольких переменных в среде MATLAB или Octave.

Пособие содержит основные теоретические сведения, описание последовательности выполнения работы, пример оформления отчета, контрольные вопросы. Оно может быть использовано студентами при выполнении исследовательских и выпускных работ.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Радиотехника».

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Цели работы .....	4
2 Краткие теоретические сведения.....	4
2.1 Метод комплексных амплитуд .....	4
2.2 Антенные решетки .....	5
3 Задание .....	10
4 Контрольные вопросы .....	12
Приложение 1. Пример оформления отчета.....	17

## 1 Цели работы

Учебные цели выполнения лабораторной работы:

- применить описание сигналов в виде комплексных амплитуд при моделировании радиотехнического устройства;
- освоить создание и использование функций в MATLAB/Octave;
- освоить вывод графиков функций нескольких переменных.

## 2 Краткие теоретические сведения

### 2.1 Метод комплексных амплитуд

Математическая модель радиосигнала может быть представлена в вещественной форме

$$S(t) = Ah(t)\cos(\omega_0 t + \varphi(t)), \quad (1)$$

где  $A$  - амплитуда,  $h(t)$  - огибающая,  $\omega_0$  - несущая частота,  $\varphi(t)$  - фаза сигнала.

В соответствии с формулой Эйлера эквивалентной записью является

$$S(t) = \operatorname{Re}\left[Ah(t)e^{j\varphi(t)}e^{j\omega_0 t}\right] = \operatorname{Re}\left[\dot{S}(t)e^{j\omega_0 t}\right], \quad (2)$$

где

$$\dot{S}(t) = Ah(t)e^{j\varphi(t)} \quad (3)$$

- комплексная амплитуда сигнала.

Описание сигналов с помощью комплексных амплитуд широко используется в алгоритмах радиотехнических устройств, при аналитических расчетах и моделировании. На это есть ряд причин:

- ослабление/усиление сигнала, сдвиг фазы, приводит к соответствующему изменению амплитуды и аргумента комплексной

амплитуды; в общем случае, любые линейные операции над сигналом могут быть описаны как преобразования его комплексной амплитуды;

- в большинстве радиотехнических приложений условная верхняя частота спектра сигнала значительно больше верхней частоты спектра комплексной амплитуды, поэтому описание сигнала в форме комплексных амплитуд позволяет уменьшить частоту дискретизации в алгоритмах обработки сигналов и компьютерных моделях.

## 2.2 Антенные решетки

В радиотехнике широкое применение находят системы пространственно разнесенных антенн:

- антенные решетки в составе радиолокационных систем для селекции и сопровождения целей;

- радиоинтерферометры со сверхдлинными базами для решения задач радиоастрономии;

- компенсаторы помех в локации, навигации, связи;

- угломерная навигационная аппаратура для определения пространственной ориентации потребителя и т.д.

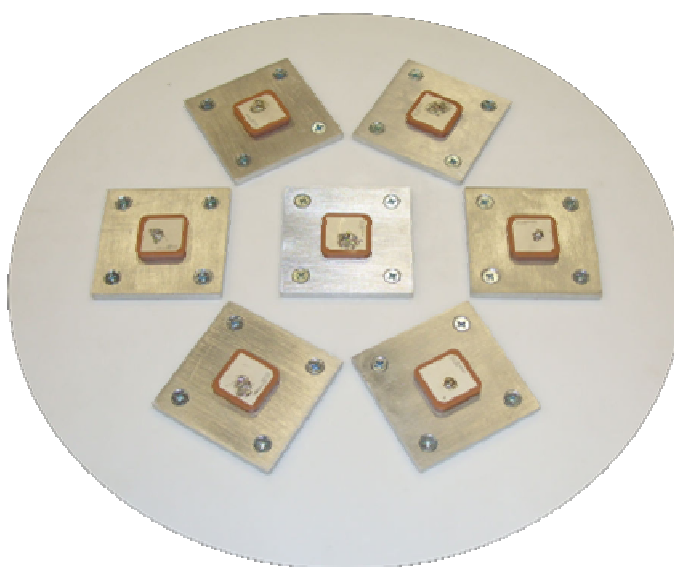


Рисунок 1 – Макет семиэлементной антенной решетки

В рамках лабораторной работы рассматриваются антенные решетки, используемые в навигационных приложениях для пространственного подавления помех и фокусировки на навигационный сигнал (устоявшееся название - «*beamformer*», см. рисунок 1). Применение антенных решеток позволяет существенно, на 40-60 дБ, повысить помехоустойчивость навигационной аппаратуры, а также подавлять мешающие переотраженные навигационные радиосигналы.

Навигационные антенные решетки имеют малые габариты (от 5 до 30 см) и небольшое число антенных элементов (2, 4, 6, 7, 8), поэтому эффективность их фокусировки, в смысле ширины луча и коэффициента усиления, невысока. Но даже при небольшом числе антенных элементов удается сформировать глубокие нули диаграммы направленности и с их помощью существенно ослабить помехи.

Рассмотрим четырехэлементную антенную решетку. Введем прямоугольную и сферическую антенную систему координат, расположив их начала в геометрическом центре антенны (см. рисунок 2).

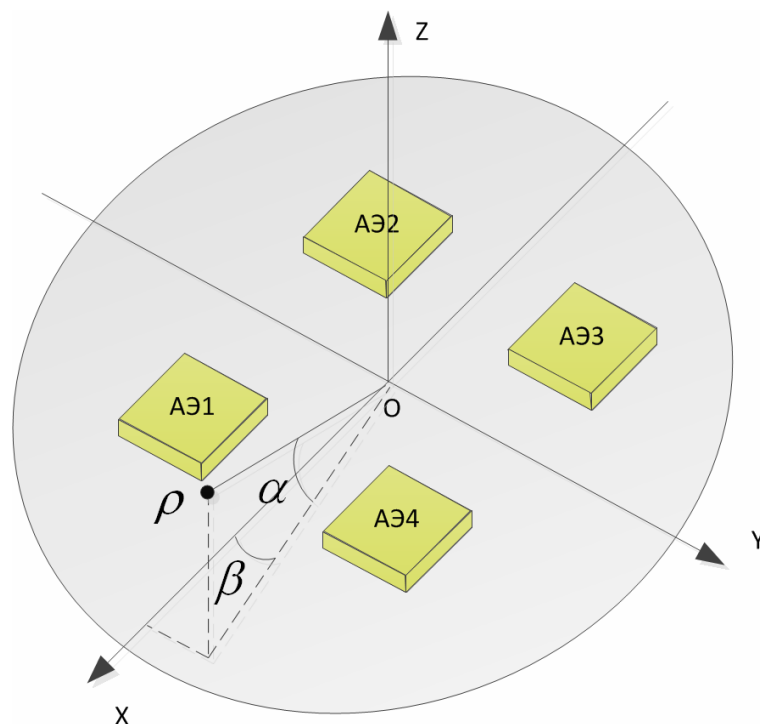


Рисунок 2 – Схема четырехэлементной антенной решетки

В антенных решетках производится функциональное преобразование совокупности сигналов антенных элементов в единый комплексный выходной сигнал. *Характеристикой направленности* в теории пространственно-временной обработки сигналов называют зависимость комплексной амплитуды  $\dot{U}(\alpha, \beta | \alpha_s, \beta_s, \alpha_j, \beta_j)$  на выходе системы пространственной обработки от направления прихода  $\alpha, \beta$  пробного сигнала (гармонической плоской волны) при фиксированных направлениях прихода полезного  $\alpha_s, \beta_s$  сигнала и помехи  $\alpha_j, \beta_j$ . В рамках лабораторной работы решается задача построения *диаграммы направленности (ДН)* антенной решетки, которая связана с характеристикой направленности соотношением

$$F(\alpha, \beta | \alpha_s, \beta_s, \alpha_j, \beta_j) = \left| \dot{U}(\alpha, \beta | \alpha_s, \beta_s, \alpha_j, \beta_j) \right|^2 \quad (4)$$

Пусть с направления  $\alpha, \beta$  на антенную решетку приходит пробный гармонический сигнал. Комплексные амплитуды выходных сигналов антенных элементов принимают вид

$$\begin{aligned} \dot{y}_1(\alpha, \beta) &= \dot{U}_a(\alpha, \beta) e^{j\varphi_0} e^{j\varphi_1(\alpha, \beta)}, \\ \dot{y}_2(\alpha, \beta) &= \dot{U}_a(\alpha, \beta) e^{j\varphi_0} e^{j\varphi_2(\alpha, \beta)}, \\ \dot{y}_3(\alpha, \beta) &= \dot{U}_a(\alpha, \beta) e^{j\varphi_0} e^{j\varphi_3(\alpha, \beta)}, \\ \dot{y}_4(\alpha, \beta) &= \dot{U}_a(\alpha, \beta) e^{j\varphi_0} e^{j\varphi_4(\alpha, \beta)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\dot{U}_a(\alpha, \beta)$  - характеристика направленности одного антенного элемента,  $\varphi_0$  - фаза сигнала изотропной антенны, соответствующая началу системы координат (без потери общности при моделировании может быть принята равной нулю),  $\varphi_m(\alpha, \beta)$  - фазовый набег к  $m$ -ой антенне относительно фазы в начале системы координат  $\varphi_0$ .

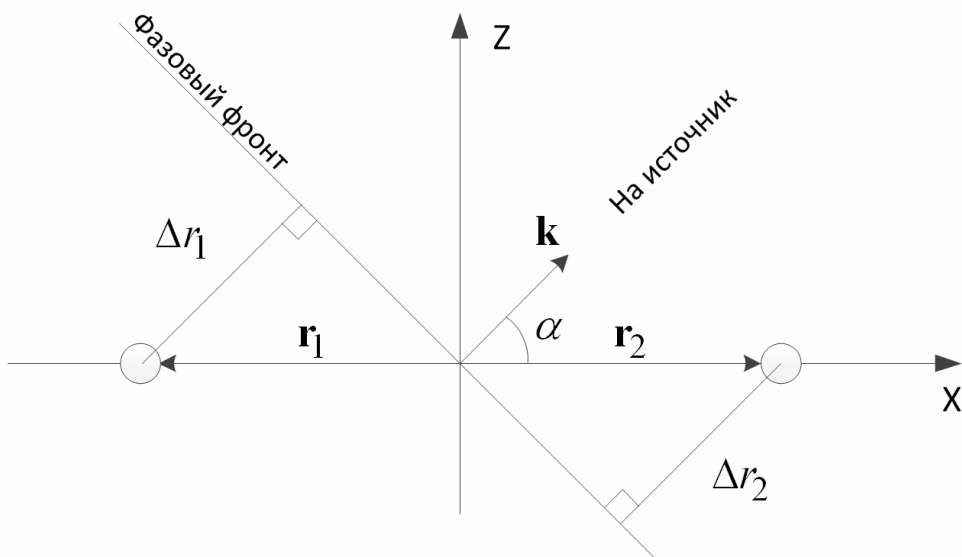


Рисунок 3 – Распространение фазового фронта

Фазовый набег  $\varphi_m(\alpha, \beta)$  легко рассчитать, зная направление прихода сигнала и радиус-вектор  $m$ -го антенного элемента  $\mathbf{r}_m$ . Обозначим  $\mathbf{k}$  - орт в направлении на источник сигнала (см. рисунок 3)

$$\mathbf{k}(\alpha, \beta) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha)\cos(\beta) \\ \cos(\alpha)\sin(\beta) \\ \sin(\alpha) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

тогда разность хода сигнала  $\Delta r_m$  между  $m$ -м антенным элементом и центром антенны находится как скалярное произведение радиус-вектора антенны и орта на источник:

$$\Delta r_m = -\mathbf{r}_m \cdot \mathbf{k}(\alpha, \beta), \quad (7)$$

откуда фазовый набег

$$\varphi_m(\alpha, \beta) = 2\pi \frac{\mathbf{r}_m \cdot \mathbf{k}(\alpha, \beta)}{\lambda}. \quad (8)$$

Выражение (5), с учетом принятых допущений, может быть представлено в матричном виде

$$\dot{\mathbf{y}}(\alpha, \beta) = \dot{U}_a(\alpha, \beta) \mathbf{H}(\alpha, \beta), \quad (9)$$



где  $\mathbf{H}(\alpha, \beta) = \begin{bmatrix} e^{j\varphi_1(\alpha, \beta)} & e^{j\varphi_2(\alpha, \beta)} & e^{j\varphi_3(\alpha, \beta)} & e^{j\varphi_4(\alpha, \beta)} \end{bmatrix}^T$  называется *вектором фокусировки*.

Из теории оптимальной пространственно-временной фильтрации известен алгоритм формирования выходного сигнала  $\dot{U}(\alpha, \beta | \alpha_s, \beta_s, \alpha_j, \beta_j)$  антенной решетки при известных направлениях на источник полезного сигнала  $\alpha_s, \beta_s$  и помехи  $\alpha_j, \beta_j$ :

$$\dot{U}(\alpha, \beta | \alpha_s, \beta_s, \alpha_j, \beta_j) = \mathbf{\beta}_w^{*T}(\alpha_s, \beta_s, \alpha_j, \beta_j) \dot{\mathbf{y}}(\alpha, \beta), \quad (10)$$

где  $\mathbf{\beta}_w$  - вектор комплексных *весовых коэффициентов* рассчитывается как

$$\mathbf{\beta}_w(\alpha_s, \beta_s, \alpha_j, \beta_j) = \frac{\mathbf{D}^{-1}(\alpha_j, \beta_j) \mathbf{H}(\alpha_s, \beta_s)}{\mathbf{H}(\alpha_s, \beta_s)^{*T} \mathbf{D}^{-1}(\alpha_j, \beta_j) \mathbf{H}(\alpha_s, \beta_s)}, \quad (11)$$

здесь  $\mathbf{D}(\alpha_j, \beta_j)$  - ковариационная матрица *шумов и помех*, определяемая для *отношения помеха/шум*  $q_{j/n}$  как

$$\mathbf{D}(\alpha_j, \beta_j) = q_{j/n} \mathbf{H}(\alpha_j, \beta_j)^{*T} \mathbf{H}(\alpha_j, \beta_j) + \mathbf{I}, \quad (12)$$

здесь  $\mathbf{I}$  - диагональная единичная матрица размером, равным числу антенных модулей (4x4 для нашего примера).

Отношение помеха/шум определяет компромисс между фокусировкой на полезный сигнал и подавлением помехи. При уменьшении  $q_{j/n}$  вклад помехи на фоне шумов снижается, алгоритм вырождается в фокусировку максимума диаграммы направленности на полезный сигнал. При увеличении – возрастает приоритет подавления помехи путем направления на неё нуля диаграммы направленности.

С учетом (4), (9), (10) выражение для формируемой диаграммы направленности антенной решетки принимает вид

$$F(\alpha, \beta | \alpha_s, \beta_s, \alpha_j, \beta_j) = F_a(\alpha, \beta) \left| \mathbf{\beta}_w^{*T}(\alpha_s, \beta_s, \alpha_j, \beta_j) \mathbf{H}(\alpha, \beta) \right|^2, \quad (13)$$

где  $F_a(\alpha, \beta)$  - диаграмма направленности одного антенного элемента.

### 3 Задание

В рамках лабораторной работы требуется:

1. Варьируя направление на помеху построить серию диаграмм направленности антенной решетки  $F(\alpha, \beta)$ .

2. Варьируя направление на помеху построить серию графиков среза диаграммы направленности антенной решетки  $F(\alpha | \beta = 0)$ , на которые нанести линии направления на полезный сигнал и помеху.

3. Построить диаграмму направленности  $F_a(\alpha, \beta)$  одного антенного элемента.

При подготовке к лабораторной работе студент выполняет первые этапы процедуры компьютерного моделирования и оформляет соответствующие разделы отчета. При выполнении домашней подготовки требуется разработать и занести в отчет (см. разделы 1-4 примера оформления отчета о лабораторной работе в Приложении 1):

- формулировку задачи;
- математическую модель объекта исследования;
- тестовые воздействия и условия, с помощью которых предлагается проверять адекватность компьютерной модели и/или её компонентов;
- алгоритм компьютерной модели, написанный на псевдокоде или в нотации MATLAB/Octave/Си; алгоритм должен содержать функцию для расчета вектора  $\mathbf{H}(\alpha, \beta)$ .

Варианты параметров задачи задаются таблицами 1, 2. Азимут помехового воздействия и полезного сигнала равен нулю ( $\beta_j = 0, \beta_s = 0$ ). В четырехэлементной антенной решетке антенные модули располагаются в

углах квадрата; в семиэлементной – шесть в углах правильного шестиугольника, одна – в центре.

Диаграмму направленности одного антенного элемента принять равной:

$$F_a(\alpha, \beta) = \left(1 + \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)\right)^2. \quad (14)$$

В лаборатории:

1. На основании подготовленного алгоритма составьте программу компьютерной модели.

2. Проверьте программу и/или её компоненты, сформировав тестовые воздействия и условия, предложенные в ходе домашней подготовки. При выявлении расхождения результатов моделирования и ожидаемых результатов проведите отладку программы.

3. Последовательно выполните моделирование по плану:

- рассчитайте и постройте диаграмму направленности одного антенного элемента;

- варьируя направление на помеху, рассчитайте и постройте серию диаграмм направленности и их срезов.

4. Оцените адекватность полученных результатов, их соответствие общетеоретическим соображениям.

5. Составьте отчет о проведенном моделировании. В состав отчета должны входить:

- постановка задачи;

- используемая математическая модель и обоснование её выбора;

- обоснование и значения ожидаемых результатов тестовых воздействий, их сопоставление с соответствующими результатами проверки компьютерной модели;

- листинг используемых в процессе исследования программ;

- полученные результаты и их интерпретация, вывод о достижении или не достижении цели исследования.

#### **4 Контрольные вопросы**

1. Что такое комплексная амплитуда сигнала?

2. Как изменяется комплексная амплитуда сигнала при прохождении фазовращателя? Как реализовать фазовращатель в программе компьютерной модели?

3. Поясните функционирование компьютерной модели и назначение используемых в ней команд.

4. Из каких этапов состоит процедура компьютерного моделирования? В чем назначение каждого этапа?

5. Как в MATLAB или Octave построить график поверхности?

6. Как произвести преобразование координат из сферической системы координат в декартову и обратно?

7. Как в MATLAB или Octave создать собственную функцию? Как ею воспользоваться?

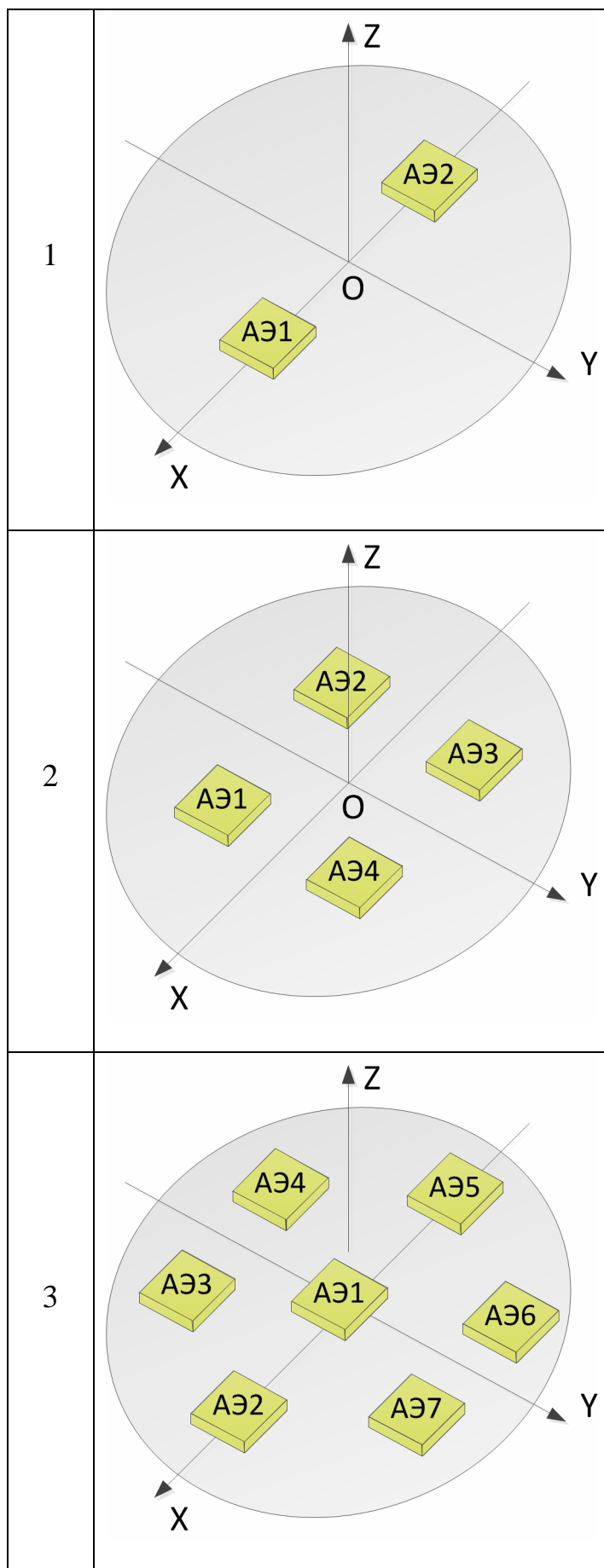
Таблица 1 – Варианты заданий

Номер варианта	Тип антенной решетки	Расстояние между антенными элементами, $l$	Отношение помеха/шум $q_{j/n}$ , дБ	Угол места направления на полезный сигнал $\alpha_s$ , град
1	1	$\lambda/2$	3	45
2	2	$\lambda/2$	3	45
3	3	$\lambda/2$	3	45
4	1	$\lambda/4$	3	45
5	2	$\lambda/4$	3	45
6	3	$\lambda/4$	3	45
7	1	$\lambda$	3	45
8	2	$\lambda/2$	10	45
9	3	$\lambda/2$	10	45
10	1	$\lambda/2$	10	45
11	2	$\lambda/4$	10	45
12	3	$\lambda/4$	10	45
13	1	$\lambda/4$	10	45
14	2	$\lambda/2$	15	45
15	3	$\lambda/2$	15	45
16	1	$\lambda/2$	15	45
17	2	$\lambda/4$	15	45
18	3	$\lambda/4$	15	45
19	1	$\lambda/4$	15	45
20	2	$\lambda$	15	45
21	3	$\lambda/2$	3	30
22	1	$\lambda/2$	3	30
23	2	$\lambda/2$	3	30
24	3	$\lambda/4$	3	30
25	1	$\lambda/4$	3	30
26	2	$\lambda/4$	3	30
27	3	$\lambda$	3	30
28	1	$\lambda/2$	10	30
29	2	$\lambda/2$	10	30
30	3	$\lambda/2$	10	30

## Окончание таблицы 1

Номер варианта	Тип антенной решетки	Расстояние между антенными элементами, $l$	Отношение помеха/шум $q_{j/n}$ , дБ	Угол места направления на полезный сигнал $\alpha_s$ , град
31	1	$\lambda/4$	10	30
32	2	$\lambda/4$	10	30
33	3	$\lambda/4$	10	30
34	1	$\lambda/2$	15	30
35	2	$\lambda/2$	15	30
36	3	$\lambda/2$	15	30
37	1	$\lambda/4$	15	30
38	2	$\lambda/4$	15	30
39	3	$\lambda/4$	15	30
40	1	$\lambda$	15	30
41	2	$\lambda/2$	3	60
42	3	$\lambda/2$	3	60
43	1	$\lambda/2$	3	60
44	2	$\lambda/4$	3	60
45	3	$\lambda/4$	3	60
46	1	$\lambda/4$	3	60
47	2	$\lambda$	3	60
48	3	$\lambda/2$	10	60
49	1	$\lambda/2$	10	60
50	2	$\lambda/2$	10	60
51	3	$\lambda/4$	10	60
52	1	$\lambda/4$	10	60
53	2	$\lambda/4$	10	60
54	3	$\lambda/2$	15	60
55	1	$\lambda/2$	15	60
56	2	$\lambda/2$	15	60
57	3	$\lambda/4$	15	60
58	1	$\lambda/4$	15	60
59	2	$\lambda/4$	15	60
60	2	$\lambda/2$	12	80

Таблица 2 – Тип антенной решетки



Приложение 1. Пример оформления отчета

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

## Отчет

о выполнении лабораторной работы №2

«Диаграмма направленности антенной решетки»

Студент гр. ЭР-77-15

Иванов Иван Иванович

Вариант 60

Преподаватель:

Сидоров Сидр Сидорович

Москва, 2020



## 1 Постановка задачи

В качестве моделируемого объекта выступает четырехэлементная антенная решетка (см. рисунок П1.1) с алгоритмом формирователя лучей по известному направлению на полезный сигнал и помеху. Расстояние между антенными элементами – половина длины волны. Антенные элементы расположены в углах квадрата.

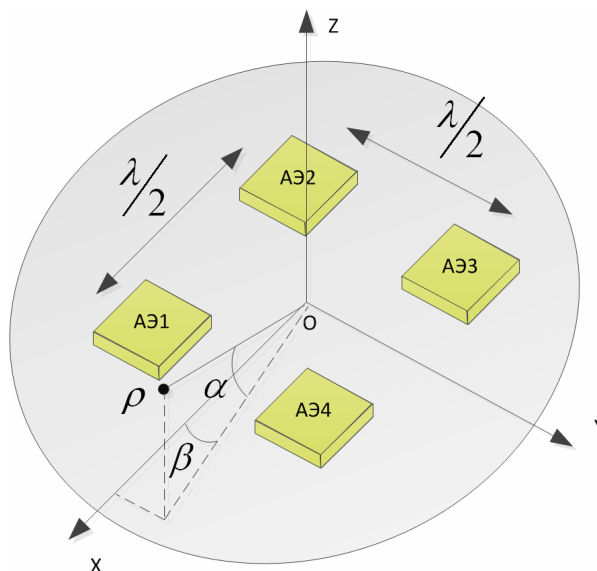


Рисунок П1.1 – Четырехэлементная антенная решетка

Известно направление на полезный сигнал (угол места 80 градусов, азимут 0). Отношение помеха/шум составляет 12 дБ. Задано выражение для диаграммы направленности одного антенного элемента.

Требуется построить диаграмму направленности (полную и срез) антенной решетки при различных направлениях на помеху, а также диаграмму направленности одного антенного элемента.

## 2 Математические модели

Алгоритмы фокусировки приведены в описании к лабораторной работе. Уточним их для данного варианта задания.

Искомая диаграмма направленности задается выражением:

$$F(\alpha, \beta | \alpha_s, \beta_s, \alpha_j, \beta_j) = F_a(\alpha, \beta) \left| \boldsymbol{\beta}_w^{*T}(\alpha_s, \beta_s, \alpha_j, \beta_j) \mathbf{H}(\alpha, \beta) \right|^2,$$

$$\boldsymbol{\beta}_w(\alpha_s, \beta_s, \alpha_j, \beta_j) = \frac{\mathbf{D}^{-1}(\alpha_j, \beta_j) \mathbf{H}(\alpha_s, \beta_s)}{\mathbf{H}(\alpha_s, \beta_s)^{*T} \mathbf{D}^{-1}(\alpha_j, \beta_j) \mathbf{H}(\alpha_s, \beta_s)},$$

$$\mathbf{D}(\alpha_j, \beta_j) = q_{j/n} \mathbf{H}(\alpha_j, \beta_j)^{*T} \mathbf{H}(\alpha_j, \beta_j) + \mathbf{I},$$

где  $\mathbf{H}(\alpha, \beta) = \left| e^{j\varphi_1(\alpha, \beta)} \quad e^{j\varphi_2(\alpha, \beta)} \quad e^{j\varphi_3(\alpha, \beta)} \quad e^{j\varphi_4(\alpha, \beta)} \right|^T$ , а для фазовых набегов

справедливо выражение  $\varphi_m(\alpha, \beta) = 2\pi \frac{\mathbf{r}_m \cdot \mathbf{k}(\alpha, \beta)}{\lambda}$ . Для заданной антенной

решетки:

$$r_1 = \left| \lambda/4 \quad -\lambda/4 \quad 0 \right|^T,$$

$$r_2 = \left| -\lambda/4 \quad -\lambda/4 \quad 0 \right|^T,$$

$$r_3 = \left| -\lambda/4 \quad \lambda/4 \quad 0 \right|^T,$$

$$r_4 = \left| \lambda/4 \quad \lambda/4 \quad 0 \right|^T.$$

Орт в направлении  $\alpha, \beta$ :

$$\mathbf{k}(\alpha, \beta) = \begin{vmatrix} \cos(\alpha) \cos(\beta) \\ \cos(\alpha) \sin(\beta) \\ \sin(\alpha) \end{vmatrix}.$$

По условию задачи диаграмма направленности одного антенного элемента описывается выражением:

$$F_a(\alpha, \beta) = \left( 1 + \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right)^2.$$

Задание начальных условий и граничных значений не требуется.

### 3 Псевдокод компьютерной модели

С учетом выбранных математических моделей получаем следующий псевдокод компьютерной модели:

*main*

*Подготовка среды*

*Диапазон направлений пробного сигнала*

*Направление на полезный сигнал*

*Направление на помеху*

*Расчет ДН одного антенного элемента  $F_a$*

*Перевод  $F_a$  из сферической в декартову СК*

*Построение диаграммы направленности  $F_a$*

*Отношение помеха/шум*

*Цикл по углу места помехи*

*Вычисление вектора весовых коэффициентов (используя  $H(\alpha, \beta)$ )*

*Цикл по углу места*

*Цикл по азимуту*

*Расчет ДН (используя  $H(\alpha, \beta)$ )*

*Конец цикла по азимуту*

*Конец цикла по углу места*

*Коррекция ДН с помощью ДН одного антенного элемента*

*Преобразование из сферических в декартовы координаты*

*Построение графика поверхности*

*Построение графика среза*

*Сохранение файлов на диск*

*Конец цикла по углу места помехи*

***H(alpha, beta)***

*Расчет вектора k*

*Координаты антенных элементов*

*Вычисление набега фаз*

*Вычисление вектор H*

*Возврат H*

## **4 Тестовые воздействия и условия**

4.1 Условия:

Проверяем функцию  $H(\alpha, \beta)$ . Направим воздействие с горизонта  $\alpha = 0, \beta = 0$ .

Ожидаемый результат:

Вектор-столбец  $\begin{bmatrix} i & -i & -i & i \end{bmatrix}^T$ .

4.2 Условия:

Проверяем функцию  $H(\alpha, \beta)$ . Направим воздействие с зенита  $\alpha = \pi/2, \beta = 0$ .

Ожидаемый результат:

Вектор-столбец  $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T$ .

4.3 Условия:

Проверяем формирование ДН. Уменьшим отношение помеха/шум до -10 дБ.

Ожидаемый результат:

Приоритет фокусировки на полезный сигнал.

4.4 Условия:

Проверяем формирование ДН. Увеличим отношение помеха/шум до 50 дБ.

Ожидаемый результат:

Приоритет расположения нуля в направлении на помеху.

## 5 Проверка модели

5.1 Проверка функции  $H(\alpha, \beta)$ , воздействие с направления горизонта на встречу оси X:

```
>> H(0, 0)
ans =
    0.0000 + 1.0000i
    0.0000 - 1.0000i
    0.0000 - 1.0000i
    0.0000 + 1.0000i
```

Результат совпадает с ожидаемым.

5.2 Воздействие с зенита:

```
>> H(pi/2, 0)
ans =
    1.0000 + 0.0000i
    1.0000 - 0.0000i
    1.0000 - 0.0000i
    1.0000 + 0.0000i
```

Результат соответствует ожиданиям. Ошибок в функции  $H(\alpha, \beta)$  не выявлено.

5.3 Проверка модели в целом. Уменьшим отношение помеха/шум до -10 дБ:

```
q_dB = -10; % jam/noise, dB
```

Результат представлен на рисунке П1.2. Как и ожидалось, диаграмма направленности практически не зависит от направления на помеху. Приоритет (по сравнению с отношением помеха/шум по заданию) фокусировки на полезный сигнал.

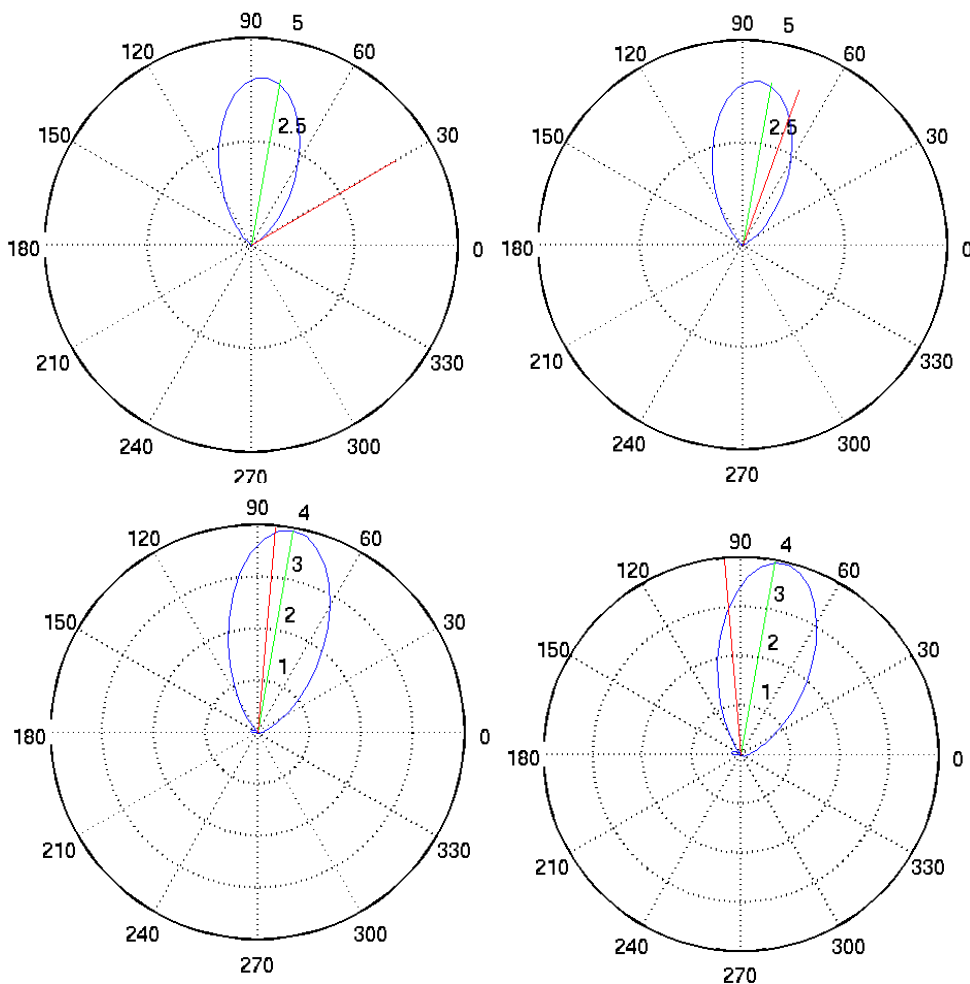


Рисунок П1.2 - Срез ДН при угле места помехи 30, 70, 85, 95 градусов при низком отношении помеха/шум

5.4 Увеличим отношение помеха/шум до 50 дБ

$q_{dB} = 50$ ; % jam/noise, dB

Результат представлен на рисунке П1.3. Приоритет приобретает ориентация нуля диаграммы направленности на помеху, что соответствует ожиданиям.

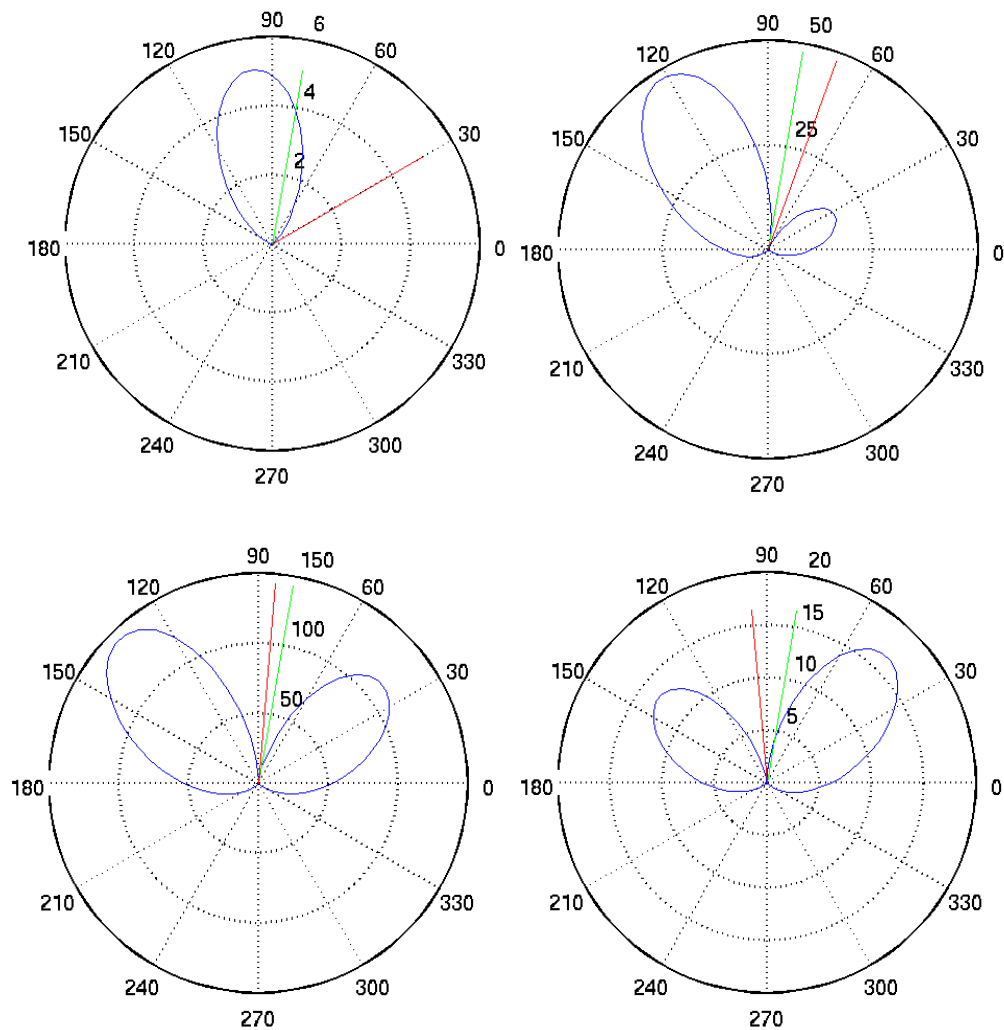


Рисунок П1.3 - Срез ДН при угле места помехи 30, 70, 85, 95 градусов при  
высоком отношении помеха/шум

## 6 Результаты моделирования

Код компьютерной модели:

**H.m:**

`%/**`

`%Focus-vector computation`

`%@param alpha - elevation, scalar, rad`

`%@param beta - azimuth, scalar, rad`

`%@return H - focus-vector`

`% relevant to antenna's center, 4x1, rad`

`%*/`

`function Hv = H( alpha, beta )`

```
k = [cos(alpha)*cos(beta); % Unit vector
     cos(alpha)*sin(beta);
     sin(alpha)];
```

```
r{1} = [1/4 -1/4 0]; % Antenna's radius-vector, lambdas
r{2} = [-1/4 -1/4 0];
r{3} = [-1/4 1/4 0];
r{4} = [1/4 1/4 0];
```

```
phi = nan(4,1);
```

```
for i = 1:4
    phi(i) = 2*pi * r{i} * k;
end
```

```
Hv = exp( 1i * phi );
end
```

### **main\_lab2.m:**

```
clear all; clc; close all;
```

```
save_res = 0; % Do you want to save results as pic/... ?
```

```
% Signal direction
```

```
alpha_s = deg2rad(80);
```

```
beta_s = deg2rad(0);
```

```
% Jammer direction
```

```
beta_j = deg2rad(0);
```

```
% Probe signal direction
```

```
alpha = deg2rad(-180:2:180);
```

```
beta = deg2rad(-90:3:90);
```

```
% One AM's radiation pattern
```



```

Fa = ones(length(beta), 1) * (1 + cos(alpha - pi/2)).^2;
[alpha_mesh, beta_mesh] = meshgrid( alpha, beta );
[xa, ya, za] = sph2cart(beta_mesh, alpha_mesh, Fa);

% Plot RP for one AM
figure(1);
surf(xa, ya, za);
xlabel('X'); ylabel('Y'); zlabel('Z');
title('Radiation pattern for one AM');
axis equal

% Memory allocation
F = nan(length(beta), length(alpha));

q_dB = 12; % jam/noise, dB
q = 10^(q_dB/10); % ... in absolute value

% Figure for common radiation pattern
figure(2)
pos = get(gcf, 'Position'); pos(3) = 800; set(gcf, 'Position', pos);

for alpha_j = deg2rad(30:5:95)

    C = H(alpha_j, beta_j);
    Dn = q * C * C' + eye(4);
    Hf = H(alpha_s, beta_s);
    beta_w = Dn \ Hf / (Hf' * (Dn \ Hf));

    for a = 1:length(alpha)
        for b = 1:length(beta)
            U = beta_w' * H( alpha(a), beta(b) );
            F(b, a) = abs(U)^2;
        end
    end
end

```

```

F = Fa .* F;

[x, y, z] = sph2cart(beta_mesh, alpha_mesh, F);

b0 = ceil(length(beta)/2); % index for beta = 0
Fb0 = F(b0, :);

subplot(1,2,1)
surf(x, y, z)
xlabel('X'); ylabel('Y'); zlabel('Z');
axis equal

subplot(1,2,2)
polar(alpha, Fb0); % Radiation pattern
hold on
polar( [alpha_s alpha_s], [0 max(Fb0)], 'g'); % Line to signal
polar( [alpha_j alpha_j], [0 max(Fb0)], 'r'); % Line to jam
hold off
drawnow

if save_res % Save figure(2) to png
    s = sprintf('pic/DN_alpha_j_%03.0f.png', round(rad2deg(alpha_j)));
    saveas(gcf, s, 'png');
    fprintf('Figure is saved at %s\n', s)
end

end

```

На рисунке П1.4 представлена диаграмма направленности одного антенного элемента.

На рисунках П1.5-П1.11 представлена серия диаграмм направленности и их срезов при варьировании направления на помеху.

Radiation pattern for one AM

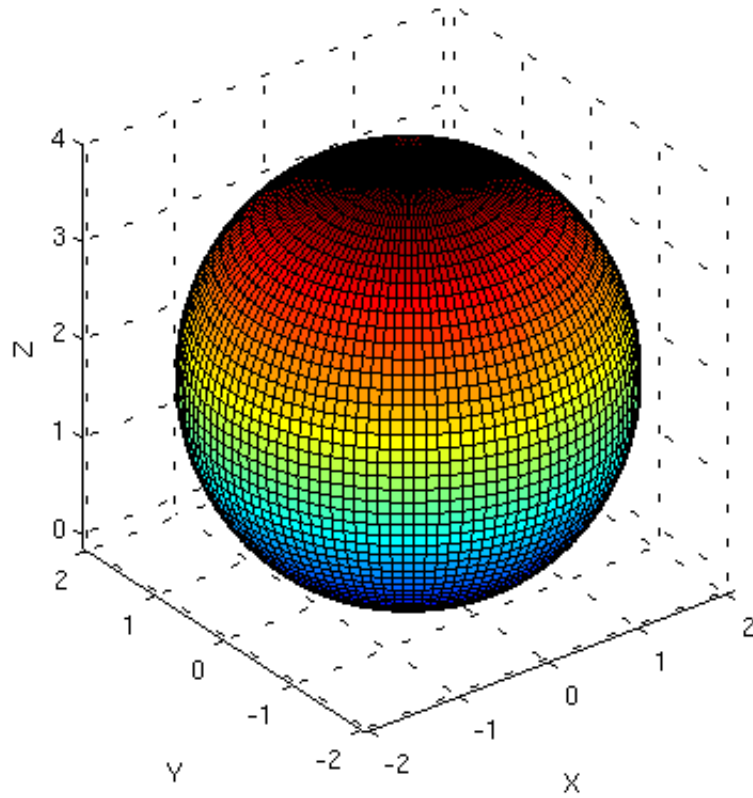


Рисунок П1.4 - ДН одного антенного элемента

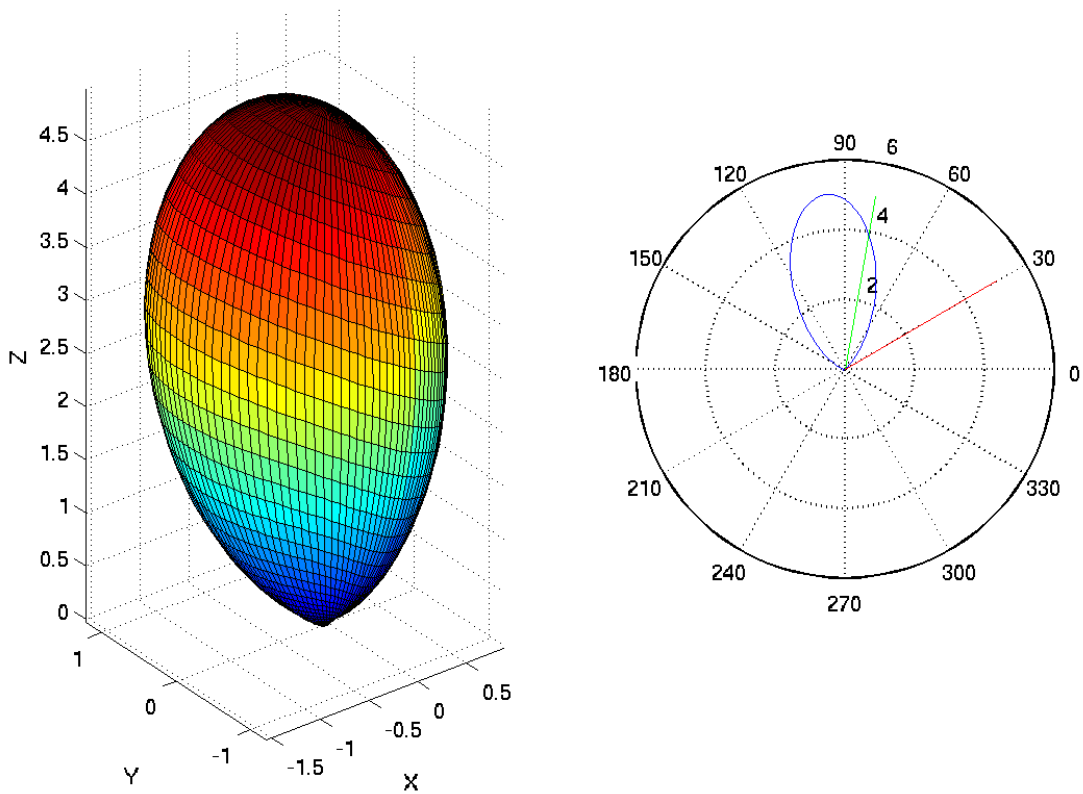


Рисунок П1.5 - ДН при угле места помехи 30 градусов

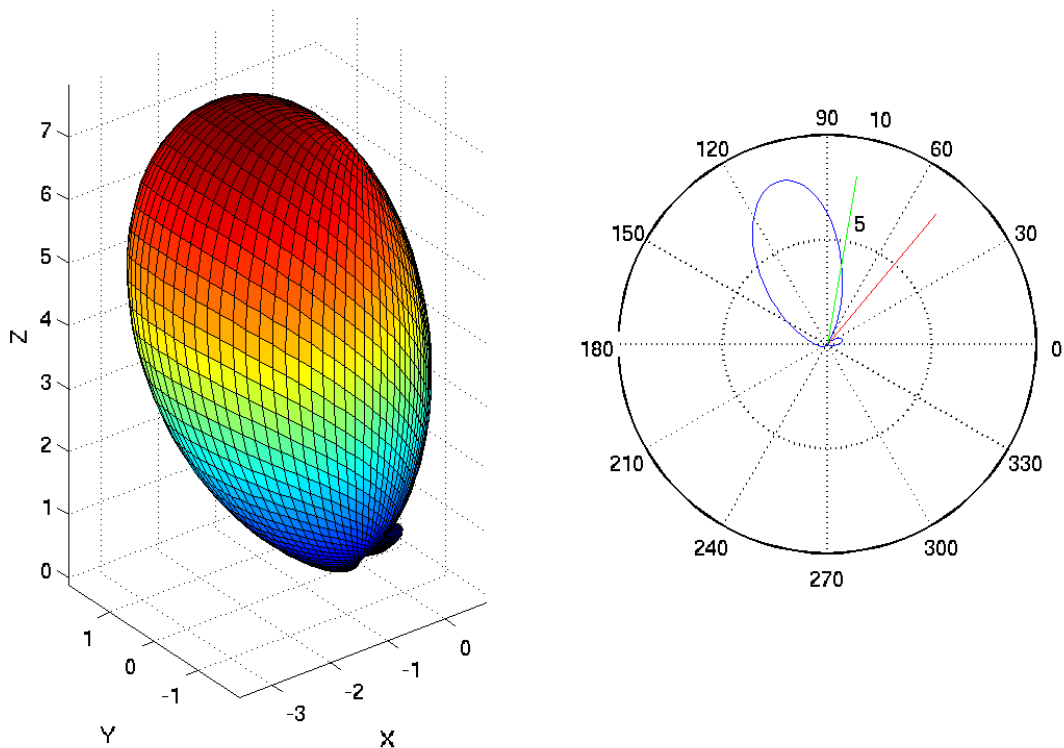


Рисунок П1.6 - ДН при угле места помехи 50 градусов

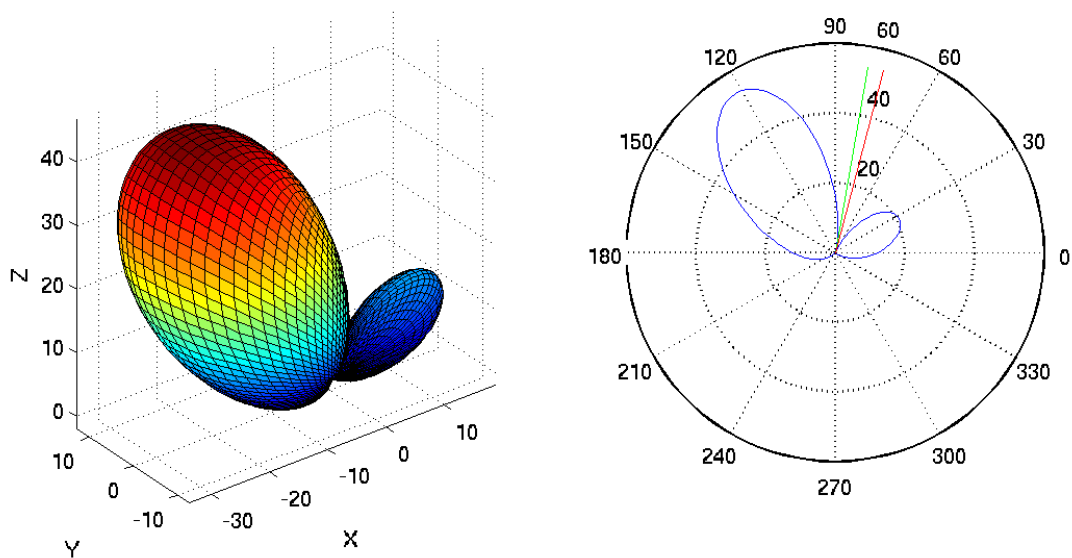


Рисунок П1.7 - ДН при угле места помехи 75 градусов

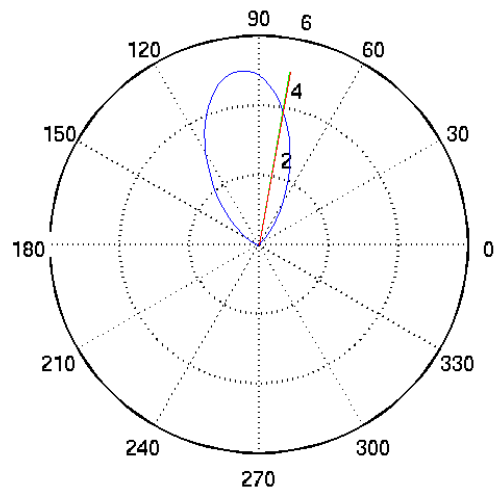
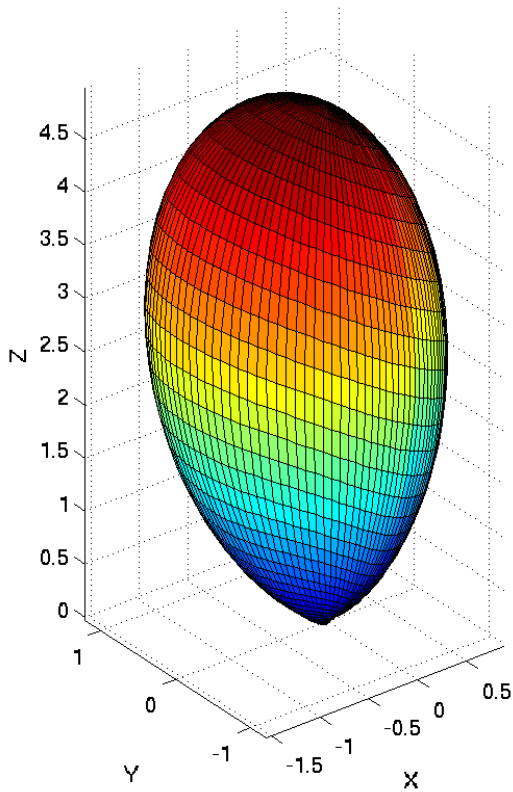


Рисунок П1.8 - ДН при угле места помехи 79.7 градусов

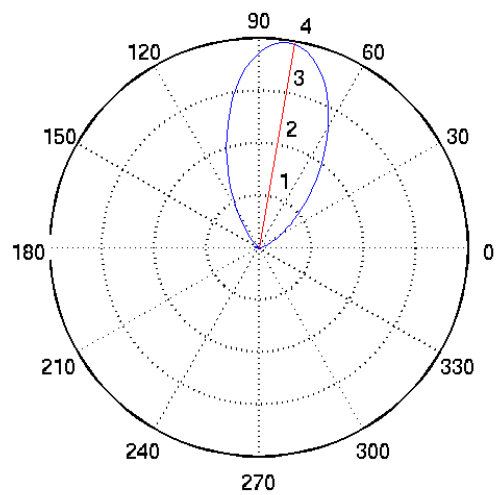
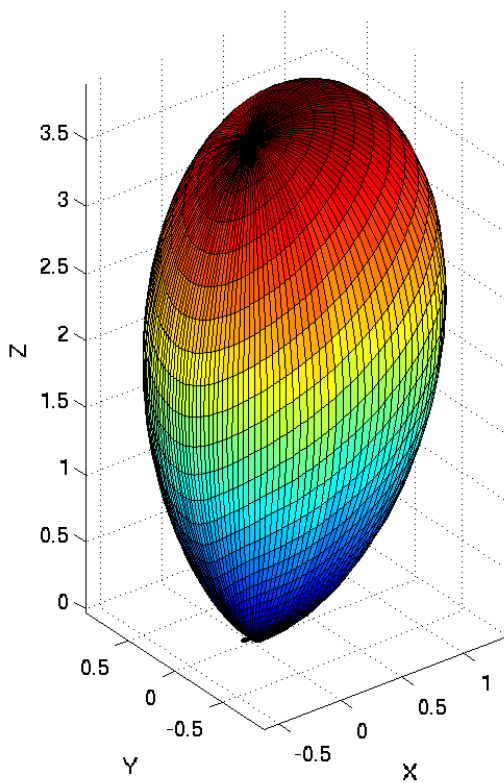


Рисунок П1.9- ДН при совпадении направлений на помеху и полезный сигнал

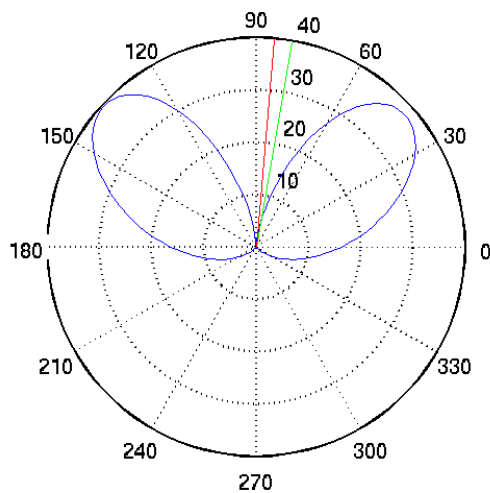
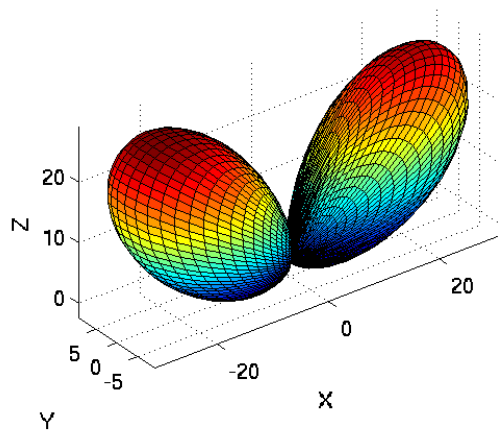


Рисунок П2.10 - ДН при угле места помехи 85 градусов

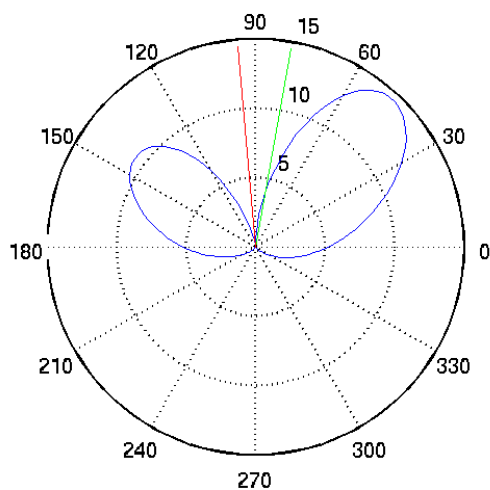
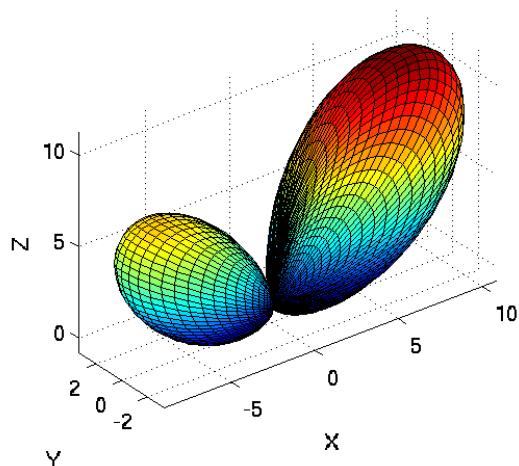


Рисунок П1.11 - ДН при угле места помехи 95 градусов

## 7 Анализ результатов моделирования

Поставленные цели моделирования достигнуты – получены требуемые диаграммы направленности. Результаты моделирования не противоречат ожиданиям и общетеоретическим соображениям. Отношение помеха/шум относительно велико, на помеху направляется ноль даже в ущерб усилению полезного сигнала, за исключением случаев совпадения направления на помеху и сигнал. Проведение новых итераций моделирования и уточнение модели не требуется.

Учебное издание

Илья Владимирович Корогодин

ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Лабораторная работа №2

Методическое пособие по курсу  
«Математическое моделирование радиотехнических устройств и систем»

для студентов, обучающихся по направлению «Радиотехника»