

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники

К.Д. Зайков, Ф.Н. Захаров, А.С. Аникин

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ
РЕШЁТКИ**

Лабораторный практикум на лабораторном стенде АФАР – 16
для студентов радиотехнических специальностей

Томск

2023

УДК 621.396.677

ББК 32.845

З 17

Рецензент:

Мещеряков А.А., доцент кафедры радиотехнических систем ТУСУР,
кандидат технических наук

Зайков, Кирилл Денисович

З 17 Исследование характеристик фазированной антенной решётки: лабораторный практикум на лабораторном стенде АФАР – 16 для студентов радиотехнических специальностей / К.Д. Зайков, Ф.Н. Захаров, А.С. Аникин — Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 31 с.

Настоящее методическое указание по лабораторной работе составлено с учётом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО).

Методические указания содержат краткие теоретические сведения о фазированных антенных решётках, описание влияние неравномерно амплитудно-фазового распределения на диаграмму направленности, описание лабораторного макета, порядок проведения лабораторных работ, а также контрольные вопросы для допуска к их выполнению.

Лабораторная работа выполняется на лабораторном стенде АФАР – 16 с использованием специального программного обеспечения для инженерных и научных расчётов.

Одобрено на заседании каф. РТС, протокол № 7 от 22.02.2023.

УДК 621.396.677

ББК 32.845

© Зайков К.Д., Захаров Ф.Н.,
Аникин А.С., 2023

© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	5
1.1 Диаграмма направленности. Основные характеристики диаграммы направленности.....	5
1.2 Формирование диаграммы направленности линейной антенной решётки	6
1.3 Управление положением луча диаграммы в пространстве.....	7
1.4 Искажения фазового распределения токов.....	9
1.4.1 Влияние фазовых изменений в системе с постоянным амплитудным распределением.....	9
1.4.2 Случайные фазовые ошибки.....	10
1.4.3 Влияние дискретности фазовращателей на параметры ДН ФАР	11
1.5 Искажения амплитудного распределения токов	11
1.5.1 Влияние формы амплитудного распределения в синфазной системе	12
1.5.2 Случайные амплитудные ошибки	12
1.6 Влияние частоты излучения.....	13
2 ОПИСАНИЕ УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА «АФАР – 16».....	14
2.1 Общий вид макета	14
2.2 Описание программного обеспечения «АФАР-16».....	16
3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «Исследование характеристик фазированной антенной решётки при электронном сканировании».....	19
3.1 Расчётное задание.....	19
3.2 Порядок выполнения лабораторной работы.....	20
3.3 Контрольные вопросы	21
4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 «Исследование влияния искажения фазового распределения на диаграмму направленности фазированной антенной решётки».....	22
4.1 Расчётное задание.....	22
4.2 Порядок выполнения лабораторной работы.....	23
4.3 Контрольные вопросы	24
5 ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТА №3 «Исследование влияния искажения амплитудного распределения и частоты излучения на диаграмму направленности фазированной антенной решётки».....	25
5.1 Расчётное задание.....	25
5.2 Порядок выполнения лабораторной работы.....	26
5.3 Контрольные вопросы	28
6 Список рекомендуемой литературы	29
Перечень используемых сокращений.....	30
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Диаграмма направленности излучателя. Функция «pattern_radiator».....	31

Введение

В настоящее время фазированные антенные решётки (ФАР) – наиболее часто применяемые антенные системы для формирования узконаправленных лучей диаграммы направленности. Применение ФАР позволяет обеспечить формирование многолучевой диаграммы направленности (ДН) с высоким коэффициентом направленного действия.

Антенная решётка из M элементов позволяет увеличить приблизительно в M раз коэффициент направленного действия антенны по сравнению с одиночным излучателем, а также сузить луч. Кроме того, современные цифровые фазированные антенные решётки позволяют адаптивно изменять ДН в соответствии с требованиями различных радиотехнических систем.

Одним из важных преимуществ ФАР по сравнению с зеркальными антеннами является возможность электронного сканирования луча в пространстве. Управление лучом осуществляется введением фазового сдвига сигналов, подводимых к каждому элементу решётки. Дискретность фазового сдвига влияет на точность управления лучом и порождает в диаграмме направленности лепестки, обусловленные квантованием фазы.

Изменяя амплитудно-фазовое распределение на антенных элементах ФАР, можно обеспечить необходимый уровень боковых лепестков (УБЛ) ДН ФАР. С целью уменьшения УБЛ переходят к неравномерному амплитудному распределению, используя так называемые оконные функции (окна), которые позволяют снизить УБЛ за счёт увеличения ширины ДН.

В реальности элементы антенно-фидерных трактов не могут быть изготовлены с одинаковыми параметрами, из-за чего в амплитудно-фазовом распределении ФАР возникают ошибки и ДН искажается. Помимо амплитудных и фазовых ошибок необходимо учитывать, что задающие и формирующие сигнал генераторы имеют свою нестабильность частоты, что также приводит к искажениям ДН.

Лабораторный практикум состоит из трёх лабораторных работ:

I. «Исследование фазированной антенной решётки». Целью лабораторной работы являются:

- Изучение принципов формирования и управления диаграммой направленности линейной фазированной антенной решётки;
- Исследование влияния количества излучающих элементов ФАР на вид ДН.
- Исследование влияния электронного качания луча на вид и форму ДН.

II. «Исследование влияния фазовращателей на диаграмму направленности фазированной антенной решётки». Целью лабораторной работы являются:

- Изучение влияния дискретности фазовращателей на ДН;
- Исследование влияния ошибок рассогласования фазовращателей на ДН.

III. «Исследование влияния искажения амплитудного распределения и частоты излучения на диаграмму направленности фазированной антенной решётки». Целью лабораторной работы являются:

- Изучение влияния амплитудного распределения на ДН;
- Исследование влияния случайных амплитудных ошибок на ДН;
- Исследование влияния частоты излучения на ДН.

В каждой лабораторной работе предусмотрено расчётное задание. Студенты перед каждым занятием лабораторной работы выполняет его самостоятельно. Наличие расчётного задания является одним из критериев допуска к выполнению основного задания.

1 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Диаграмма направленности. Основные характеристики диаграммы направленности

Антенная решётка (АР) — сложная антенна, содержащая совокупность *излучающих элементов*, расположенных в пространстве в определенном порядке, ориентированных и возбуждаемых так, чтобы получить заданную диаграмму направленности.

Излучающий элемент (антенной решётки) – составная часть антенной решётки, являющаяся антенной или группой антенн с заданным возбуждением.

Фазированная антенная решётка (ФАР) – антенная решётка, направление излучения и (или) форма диаграммы направленности которой регулируются изменением амплитудно-фазового распределения токов или полей возбуждения на *излучающих элементах*.

Антенно-фидерные устройства – совокупность соединённых вместе линий передач, антенн и других устройств, обеспечивающих преобразование, согласование, распределение электромагнитной энергии, ее селекцию по поляризации или частоте и т.п.

Диаграмма направленности – это зависимость в дальней зоне комплексных компонент напряжённости электрического поля от угловых переменных θ, φ сферической системы координат. Диаграмма направленности может быть получена преобразованием Фурье от апертурного распределения антенной решетки. Общая форма записи диаграммы направленности:

$$\vec{F}(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi) \cdot \vec{p}(\theta, \varphi) \cdot e^{i\Phi(\theta, \varphi)}.$$

Диаграмма направленности бывает *амплитудной* $F(\theta, \varphi)$, *поляризационной* $\vec{p}(\theta, \varphi)$ и *фазовой* $\Phi(\theta, \varphi)$.

Когда говорят о диаграммах направленности, прежде всего понимают амплитудную диаграмму. Амплитудная диаграмма направленности характеризует возможность антенны концентрировать энергию в заданном угловом секторе в пространстве.

Приведем основные характеристики диаграммы направленности антенны на примере амплитудной диаграммы направленности, представленной на рисунке 1.1.

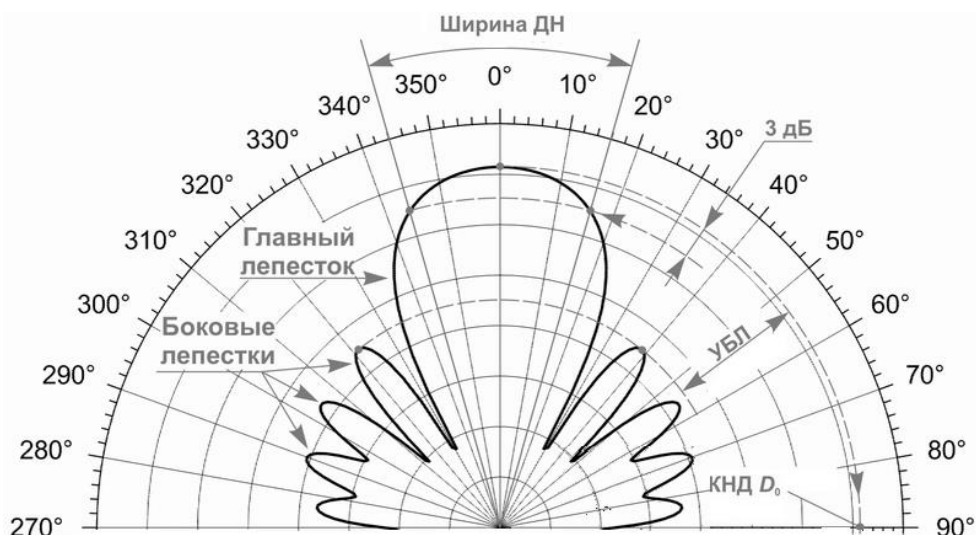


Рисунок 1.1 – Пример амплитудной диаграммы направленности

Диаграмма направленности антенны характеризуется такими параметрами, как:

- ширина диаграммы направленности;
- коэффициентом направленного действия;
- уровнем и количеством боковых лепестков.

Ширина диаграммы антенны отсчитывается на заданном уровне от максимального значения. Принято использовать уровень половинной мощности (уровень -3 дБ) от максимума ДН по мощности ($2\theta_{0,5}$) или уровень 0,707 (уровень -3 дБ) от максимума ДН по напряжённости ($2\theta_{0,7}$).

Коэффициент направленного действия (КНД) показывает во сколько раз плотность потока мощности, излучаемой антенной в направлении (θ, φ) больше плотности потока мощности, излучаемой изотропной антенной, при условии равенства мощностей, излучаемых обеими антеннами в окружающее пространство [1]. Под КНД будем понимать значение в направлении максимума излучения, см. рисунок 1.1.

Уровень боковых лепестков (УБЛ) – отношение максимума боковых лепестков к главному максимуму.

1.2 Формирование диаграммы направленности линейной антенной решётки

Диаграмма направленности антенной решетки представляет собой произведение диаграммы направленности отдельного элемента и множителя направленности антенной решетки, что описывается принципом перемножения диаграмм направленностей [1].

Принцип перемножения диаграмм направленности. В силу линейности уравнений Максвелла электромагнитное поле системы излучателей представляет собой сумму полей её отдельных элементов. Если эти элементы имеют одинаковые размеры, одинаковые амплитудно-фазовые распределения возбуждающего поля или тока, ориентированы в пространстве одинаковым образом и расположены на одинаковом расстоянии друг от друга, то суммарная ДН такой системы может быть записана в виде:

$$F_{\Sigma}(\theta, \varphi) = F_{эл}(\theta, \varphi) f_{\Sigma}(\theta, \varphi),$$

где $F_{эл}(\theta, \varphi)$ — ДН элемента; $f_{\Sigma}(\theta, \varphi)$ — скалярный множитель направленности.

Рассмотрим случай, когда начало системы координат находится на одном из концов линейной антенной решётки (ЛАР или линейной ФАР), состоящей из N излучателей, как показано на рисунке 1.2.

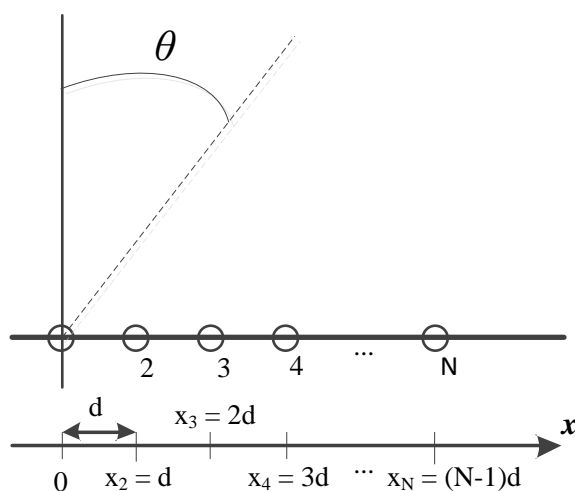


Рисунок 1.2 – Геометрия линейной антенной решётки

Множитель направленности линейной ФАР, изображённой на рисунке 1.2, будет описываться выражением [1]:

$$f_{\Sigma}(\theta) = \sum_{n=1}^N \dot{I}_n e^{jk(n-1)d \cdot \sin(\theta)}, \quad (1.1)$$

где $\dot{I}_n = I_n e^{j\Phi_n}$ – комплексная амплитуда тока в n-ом излучателе; I_n и Φ_n – амплитуда и фаза на n-м элементе; d – шаг между элементами ФАР; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Если распределение амплитуд возбуждающих токов равномерно (амплитуды токов равны), а распределение фаз питающих токов линейное (разность фаз между элементами постоянна), то формула (1.1) приобретает вид [1]:

$$f_{\Sigma}(\theta) = \frac{\sin(\psi(\theta))}{N \sin(\psi(\theta)/N)}, \quad (1.2)$$

где $\psi(\theta) = 0.5Nkd \sin(\theta - \Delta\varphi/kd)$; $\Delta\varphi$ — разность фаз между соседними элементами.

Характеристики диаграммы направленности линейной ФАР

Для эквидистантной ЛАР с равномерным амплитудно-фазовым распределением (АФР) ширина диаграммы направленности приближено может быть вычислена по формуле:

$$2\theta_{0,5} = 0,89 \frac{\lambda}{(N-1)d} = 0,89 \frac{\lambda}{L_{\Sigma}} \quad (1.3)$$

где N — количество антенных элементов в ЛАР, d — расстояние между соседними элементами, λ — длина волны, L_{Σ} — эквивалентный размер ЛАР.

При использовании формулы (1.3) для расчета ширины ДН при $N = 3$ погрешность составляет 5%, а при $N > 6$, погрешность не превышает 1%.

Для антенной решётки коэффициент направленного действия представляет собой произведение КНД отдельного элемента на количество излучателей в решётке.

Для антенных решеток, у которых амплитудное распределение равномерно, а распределение фаз питающих токов линейно, при количестве излучателей $N > 9$ УБД будет составлять 13,26 дБ.

Обобщённая структурная схема линейной ФАР

Структурная схема ФАР представлена на рисунке 1.3, она состоит из усилителей (У), фазовращателей (ФВ) и сумматора.

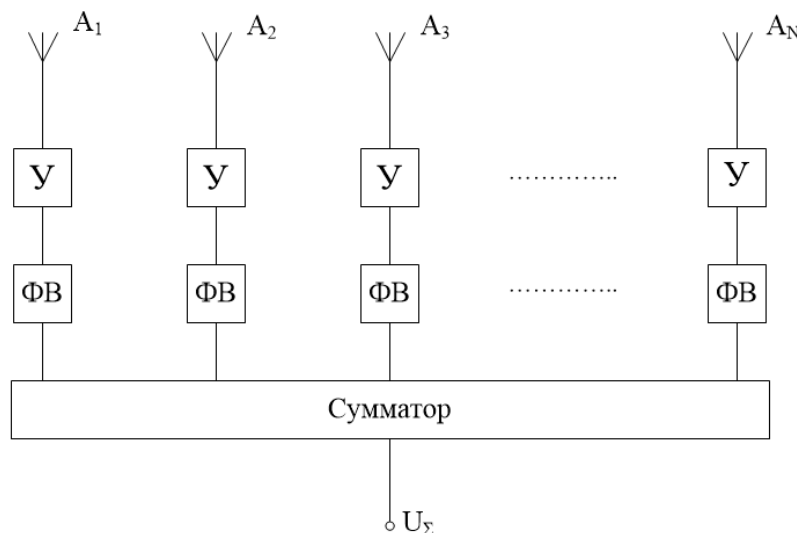


Рисунок 1.3 — Структурная схема ФАР

С помощью усилителей и фазовращателей задаётся амплитудно-фазовое распределение питающих или принятых токов ФАР, изменяя которое формируется диаграмма с заданными параметрами излучения. Данная задача называется синтезом диаграммы направленности.

1.3 Управление положением луча диаграммы в пространстве

Непревзойдённым преимуществом, которым обладает ФАР по сравнению с обычной антенной или антенной решёткой это возможность управлять положением луча с

помощью искажения фазового распределения на излучателях без механического поворота антенны. Сканирование пространства лучом, который изменяет положения максимума из-за искажения фазового распределения принято называть *электронным сканированием*.

Искажение фазового распределение на излучателях должно быть равномерное и иметь постоянный фазовый сдвиг $\Delta\varphi$ между соседними излучателями. Для того, чтобы вывести формулу расчёта фазового сдвига $\Delta\varphi$, рассмотрим двухэлементную линейную антенную решётку, на которую падает плоская волна под углом θ_0 относительно нормали к ней, см. рисунок 1.4.

В результате того, что плоская волна приходит на элементы под некоторым углом θ_0 , расстояние, которое преодолевает волна для приёма антеннами A_1 и A_2 , разное и отличается на величину Δd , которая пропорциональна разности фаз $\Delta\varphi$.

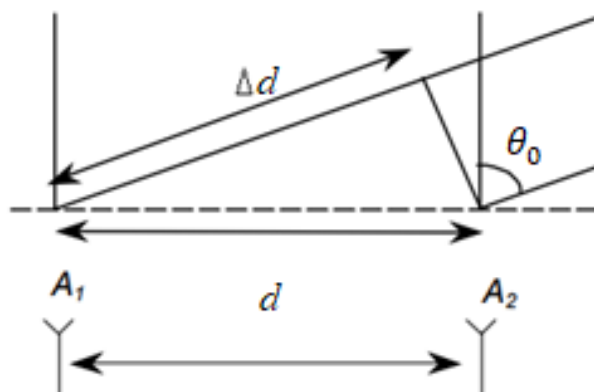


Рисунок 1.4 – К пояснению получения фазового сдвига на двухэлементной ЛАР, если сигнал приходит с направления θ_0

Таким образом, разность фаз волн между антенными элементами A_1 и A_2 , будет определяться следующим выражением:

$$\Delta\varphi = kd \sin(\theta_0), \quad (1.4)$$

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

Аналогично, чтобы сформировать направление излучение N -элементной линейной ФАР в заданном направлении θ_0 фазовое распределение на элементах должно быть рассчитано по формуле:

$$\Phi_n = n\Delta\varphi, \quad (1.5)$$

где $n = 0, 1, \dots, N-1$ – порядковый номер элемента линейной ФАР

Расчётное значение фазы по формуле (1.5) может оказаться равным тысячи градусов. Очевидно, что практическая реализация таких значений фазы затруднена. Учитывая явление периодичности гармонических сигналов, из расчётной фазы, вычитается целое число периодов (т.е. 360°) и реализуется оставшееся фазовый сдвиг (см. рисунок 1.5).

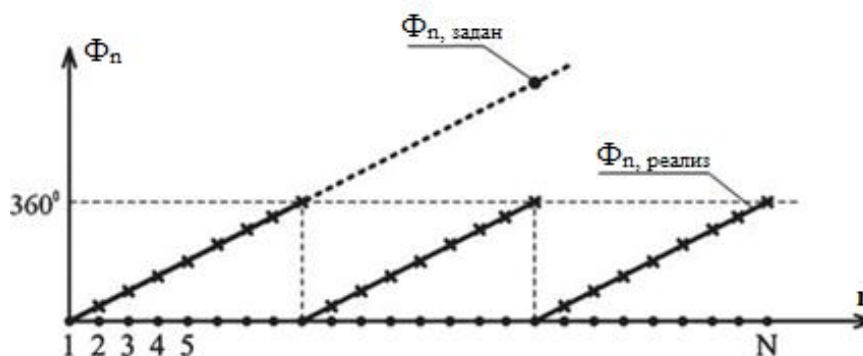


Рисунок 1.5 — Явление сброса фазы

Характеристики диаграммы направленности при электрическом сканировании

При смещении максимума излучения с направления нормали главного лепестка диаграммы будет расширяться, что связано с уменьшением эквивалентного размера антенной решётки. При этом ширину ДН при отклонении луча на угол θ_0 можно рассчитать по формуле:

$$2\theta_{0,5} = 0,89 \frac{\lambda}{(N-1)d \cdot \cos(\theta_0)} = 0,89 \frac{\lambda}{L_э},$$

где $L_э = (N-1)d \cos(\theta_0)$ – эквивалентный размер антенного элемента, который уменьшается из-за отклонения луча относительно нормали.

КНД, напротив, будет уменьшаться, поскольку эквивалентный размер антенны становится меньше. При отклонении луча на угол θ_0 КНД рассчитывается по формуле:

$$КНД(\theta_0) = КНД(\theta_0 = 0) \cos(\theta_0).$$

При сканировании луча, в области реальных углов, кроме расширения ДН, появляются паразитные *дифракционные лепестки* высших порядков. Данный эффект происходит из-за периодичности функции множителя направленности. Направление главных максимумов *дифракционных лепестков* определяются из условия [2]:

$$\theta_m = \arccos\left(\sin(\theta_0) + m \frac{\lambda}{d}\right).$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ — номер главного максимума.

При проектировании ФАР параметры антенной решётки подбирают так, чтобы при заданных углах отклонения луча дифракционные лепестки не появлялись. Сектор углов, в котором отсутствуют *дифракционные лепестки*, называется *сектором сканирования*.

1.4 Искажения фазового распределения токов

Из-за несовершенства технологий или ошибок в изготовлении антенно-фидерного устройства каналы антенной решётки имеют разную геометрическую длину, что в свою очередь приводит к неравномерному фазовому распределению. В следствие чего форма диаграммы направленности искажается и снижается коэффициент направленного действия. Различают систематические (детерминированные) и случайные фазовые искажения (ошибки).

1.4.1 Влияние фазовых изменений в системе с постоянным амплитудным распределением

Представим фазовое распределение как некоторую функцию, которая может быть разложена в ряд вида:

$$\Phi(n) = \Phi_1(n) + (\Phi_2(n))^2 + (\Phi_3(n))^3 + \dots, \quad (1.6)$$

если $\Phi(n) = 0$, то искажения отсутствуют, режим синфазный.

Произведём оценку влияния каждого слагаемого (1.6) на форму ДН [1].

1. Линейный закон изменения фазы $\Phi(n) = \Phi_1(n)$.

В этом случае происходит отклонение максимума главного лепестка ДН относительно нормали к плоскости раскрыва антенны на угол θ_0 , который определяется с помощью выражения (1.5) в сторону края, где наблюдается отставание фазы. Отклонение лепестка сопровождается его расширением и уменьшением КНД антенны (см. рисунок 1.4).

2. Квадратичный закон изменения фазы $\Phi(n) = (\Phi_2(n))^2$.

При $|\Phi_2| < \pi$ смещение максимума ДН не происходит, но снижается коэффициент направленного действия. В ДН появляются симметричные искажения, которые заключаются в расширении главного лепестка (вплоть до его раздвоения при $|\Phi_2| > \pi$),

росте боковых лепестков и их слиянии с главным лепестком, что вызывает ещё большее его расширение (см. рисунок 1.4). Если $|\Phi_2| < \pi/4$, то множитель направленности системы мало отличается от случая синфазного распределения.

3. Кубический закон изменения фазы $\Phi(n) = (\Phi_3(n))^3$.

Так как данная функция несимметрична, то при изменении фазы по кубическому закону главный лепесток диаграммы не только расширяется, но и отклоняется в сторону отставания фазы. Вместе с этим нарушается симметрия ДН. Уровень боковых лепестков в направлении отклонения ДН становится выше, а в другом направлении — ниже (см. рисунок 1.6).

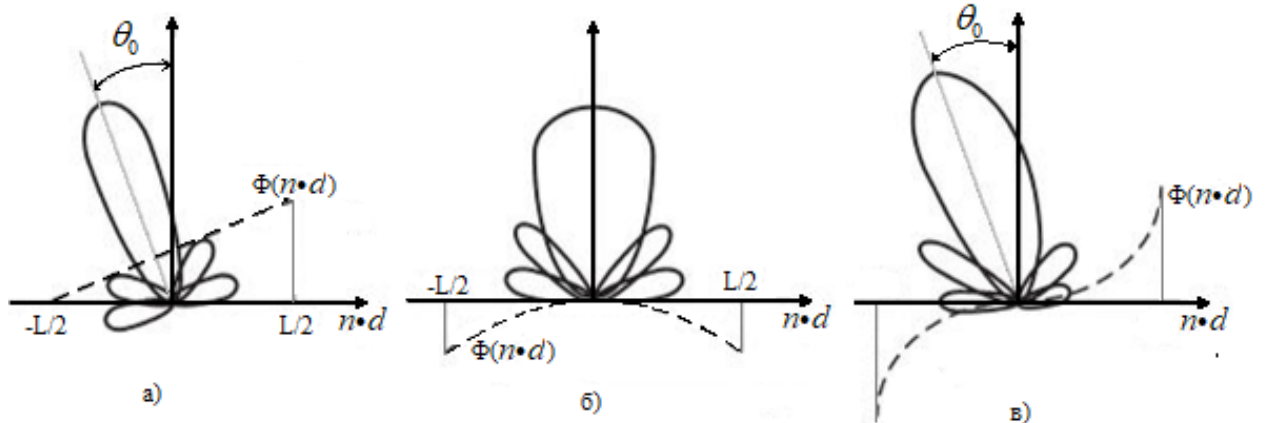


Рисунок 1.6 – Влияние фазовых искажений на форму ДН, если фаза изменяется по:
а – линейному закону; б – квадратичному закону; в – кубическому закону

1.4.2 Случайные фазовые ошибки

Случайные фазовые ошибки, как правило, возникают и в процессе изготовления, и в процессе эксплуатации антенн. Эти ошибки приводят к случайным изменениям формы ДН, которая может рассматриваться как случайная функция. Поэтому анализ диаграммы направленности требует применения статистической теории антенн.

Рассмотрим влияние данных ошибок на ДН, то есть среднюю ДН (математическое ожидание диаграммы направленности). Будем считать фазовое распределение нормальной случайной функцией с нулевым средним значением, постоянным вдоль системы с дисперсией $\sigma^2(x) = \alpha$ и коэффициентом корреляции [3]:

$$r(x, x_1) = \exp\left[-(x - x_1)^2 / c^2\right],$$

где $c = 2p/L$ – относительный радиус корреляции в относительных единицах; p – радиус корреляции фазовых ошибок, характеризующий расстояние, в пределах которого фазовые ошибки в антенне можно считать взаимосвязанными; L – длина антенной системы, x – координаты антенных элементов.

Семейство средних ДН представлено на рисунке 1.7.

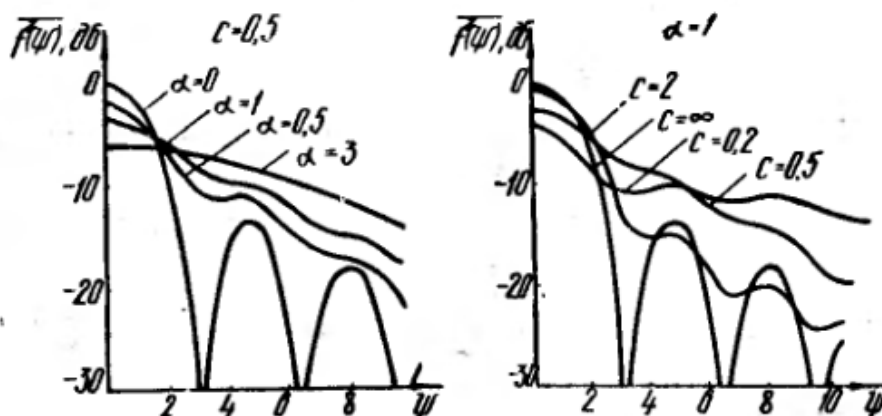


Рисунок 1.7 — Средние диаграммы направленности при случайной фазе

Из рисунка 1.7 видно, что увеличение дисперсии ошибок приводит к уменьшению поля в направлении главного максимума, заполнению нулей, увеличению бокового излучения, расширению главного лепестка. Характер диаграммы изменяется от осциллирующей к монотонно убывающей. К таким же эффектам приводит и уменьшение радиуса корреляции.

1.4.3 Влияние дискретности фазовращателей на параметры ДН ФАР

Для управление фазовым распределением токов (полей) используют фазовращатели. Широкое распространение получили дискретные фазовращатели, поскольку они более стабильны и их стоимость меньше, по сравнению с непрерывными фазовращателями. При использовании дискретных фазовращателей линейная фазовая характеристика искажается, и приобретает форму ступенчатой фазовой кривой, что порождает пилообразную кривую ошибок (рисунок 1.8).

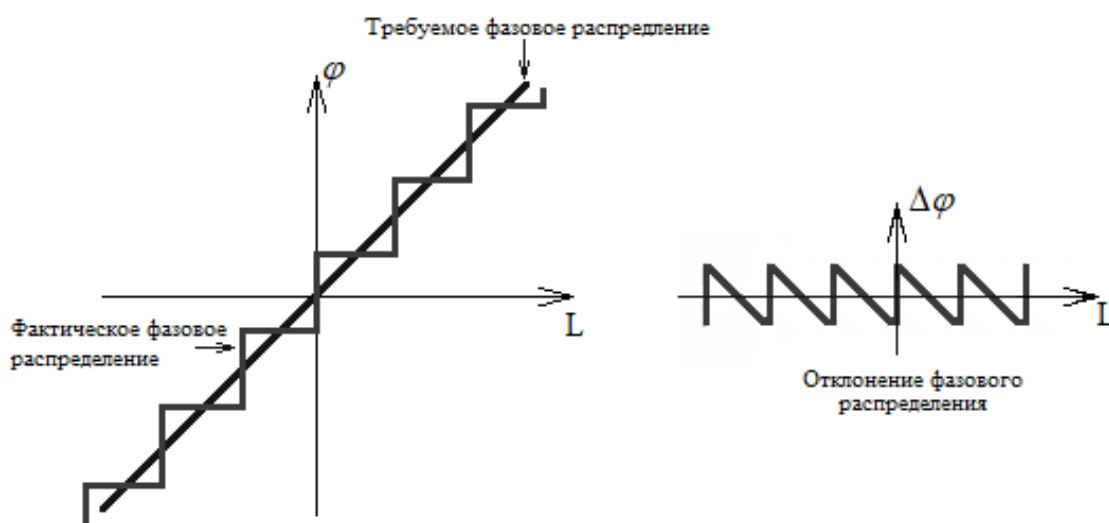


Рисунок 1.8 — Ошибки дискретизации фазы

Поскольку антенная решётка дискретна сама по себе, важную роль играет положение элементов на пилообразной кривой. Имеется два варианта распределения элементов на кривой.

В первом количество элементов меньше, чем число ступенек кривой (на одну ступеньку приходится один излучатель). В этом случае происходит незначительное увеличение боковых лепестков, которое сопровождается небольшим уменьшением коэффициента усиления и зависит от дискретности фазовращателя.

Во втором случае на фазовую ступеньку приходятся два или более элементов, и фазовое распределение приобретает вид ступеньки. Это квантование порождает ряд лепестков, называемых лепестками квантования, имеющих предсказуемые амплитуды и угловые положения.

1.5 Искажения амплитудного распределения токов

Из-за несовершенства технологий или ошибок в изготовлении антенно-фидерного устройства каналы антенной решётки имеют разный коэффициент передачи, что в свою очередь приводит к неравномерному амплитудному распределению. В следствие чего форма диаграммы направленности искажается и снижается коэффициент направленного действия. Различают систематические (детерминированные) и случайные фазовые искажения (ошибки).

1.5.1 Влияние формы амплитудного распределения в синфазной системе

Основным недостатком ФАР с постоянным амплитудным распределением является высокий уровень бокового излучения (–13,2 дБ). С целью уменьшения уровня боковых лепестков переходят к неравномерному амплитудному распределению, максимальному в центре и симметрично спадающему к краям, например типа «косинус на пьедестале» или «Дольфа – Чебышева».

Амплитуда токов при использовании оконной функции «косинус на пьедестале» описывается формулой [1]:

$$I_n = \delta + (1 - \delta) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \pi \frac{n}{N-1}\right), \quad (1.6)$$

где $n = 0, 1, \dots, N - 1$ — порядковый номер антенного элемента.

Оптимальными диаграммами принято называть диаграммы, наилучшим образом удовлетворяющие различным практическим требованиям. В частности, к антеннам с оптимальной диаграммой направленности относятся антенны, у которых обеспечивается наименьший уровень боковых лепестков при заданной ширине главного максимума и, наоборот, наименьшая ширина главного максимума при заданном уровне боковых лепестков. Такие антенны называются Дольф – Чебышевскими оптимальными антеннами.

Для чётного и нечётного числа излучателей амплитуды токов вычисляются по формулам (1.7) и (1.8), соответственно [2]:

$$I_n = \sum_{p=n}^N (-1)^{N-p} \alpha^{2p-1} \frac{(2N-1)(p+N-2)!}{(p-n)!(p+n-1)!(N-p)!}, \quad (1.7)$$

$$I_n = \sum_{p=n}^N (-1)^{N-p} \alpha^{2p} \frac{2N(p+N-1)!}{(p-n)!(p+n)!(N-p)!}. \quad (1.8)$$

Если задан уровень боковых лепестков q , то параметр α (масштабирующий коэффициент) определяется по формуле (1.9) [2]:

$$\alpha = \operatorname{ch}\left(\frac{1}{N-1} \operatorname{arcch}\left(\frac{1}{q}\right)\right). \quad (1.9)$$

1.5.2 Случайные амплитудные ошибки

В статистической теории антенн подробно рассмотрено влияние фазовых ошибок возбуждения излучателей на статистические характеристики антенных решёток (средняя диаграмма направленности, СКО диаграммы направленности). Ошибки возбуждения по фазе значительно сильнее увеличивают уровень бокового излучения и уменьшают КНД по сравнению с ошибками возбуждения по амплитуде. Влияние амплитудных ошибок почти не рассмотрено, но их влияние аналогично влиянию фазовых ошибок [5].

Ошибки возбуждения излучателей по амплитуде возникают по нескольким причинам. Среди них [3]:

- конструктивные причины (ошибки изготовления излучателей), приводящие к различию в согласовании излучателей с линией передачи;
- различия в амплитудно-частотных характеристиках усилителей из-за разброса номиналов элементов схем усилителей и других причин.

Исследования показывают, что наличие аддитивных ошибок возбуждения по амплитуде не приводит к флуктуациям главного максимума.

При увеличении дисперсии фазовых ошибок уменьшается уровень поля в направлении главного максимума, что приводит к заполнению нулей, увеличению бокового излучения, расширению главного лепестка. Характер диаграммы изменяется от осциллирующей к монотонно убывающей.

1.6 Влияние частоты излучения

Влияние частоты излучения на диаграмму направленности студентам необходимо изучить самостоятельно. Для этого необходимо использовать основные формулы по синтезу диаграммы (1.1) – (1.5).

Диаграмма направленности характеризуется шириной полосы пропускания. Ширина полосы пропускания — это область рабочих частот антенны, где уровень принимаемого или излучаемого антенной сигнала находится в пределах 0.7 от максимальной амплитуды сигнала, а мощность в пределах 0.5 от максимальной мощности сигнала.

2 ОПИСАНИЕ УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОГО КОМПЛЕКСА «АФАР – 16»

В учебно-лабораторном комплексе «АФАР – 16» вместо электромагнитной (ЭМ) волны используются акустические волны. Особенности применения акустических волн приведено ниже:

1. Распространение, отражение, преломление, сложение, вычитание и другие волновые эффекты для ЭМ и акустических волн одинаковы. Следовательно, с точки зрения волновых эффектов, использование акустической волны полностью эквивалентно ЭМ волне.

2. Затухание акустических волн для длины волны комплекса 8,5 мм присутствует, как и для электромагнитных колебаний. Это затухание следует учитывать как при использовании ЭМ волны, так и при использовании акустических волн. Затухание акустических волн на используемой длине волны составляет около 0,3 дБ/м. Эти потери следует учитывать при расчётах.

3. Эквивалентность пространства-времени. Скорость распространения ЭМ волны в воздухе $3 \cdot 10^8$ м/с, а скорость распространения звука в атмосфере около 343 м/с при нормальных условиях. Таким образом, объект, удалённый от акустической РЛС на 1 м, соответствует реальному объекту, удалённому на $3 \cdot 10^8 / 343 = 874,6$ км.

4. Эквивалентность скоростей. Эффект Доплера. Реальный объект, движущийся в пространстве со скоростью 300 м/с (около 1000 км/час) приводит к изменению принятой длины волны за счёт эффекта Доплера на $1/1000000$. В акустической РЛС изменение принятой длины волны на одну миллионную соответствует скорости объекта 0,343 мм/с.

5. Безопасность использования. Использование акустических волн вместо электромагнитных существенно повышает безопасность использования радиолокационного комплекса. Электромагнитное излучение миллиметрового диапазона вредно для организма. Используемые ультразвуковые излучатели имеют небольшую мощность излучения существенное затухание в воздухе, что обеспечивает безопасность использования в лабораторных условиях.

6. Поляризация эффекты. Акустические волны не имеют поляризации и поляризационные эффекты отсутствуют, в отличие от электромагнитных волн.

2.1 Общий вид макета

Общий вид лабораторного макета показан на рисунке 2.1. Он состоит из радиолокационной стойки с антенным блоком, мобильной антенной системы на собственной стойке, рамы с поворотным подвесом и блока передачи, приёма, управления, обработки, сопряжения (БППУ), который непосредственно связывается с ЭВМ.

На рисунке 2.1 представлено: 1 – радиолокационная стойка; 2 – мобильная антенная система; 3 – блок визуализации и внешнего управления (ПЭВМ); 4 – рама с поворотным подвесом для объектов обнаружения; 5 – цель (объект) обнаружения; 6 – патч-корды подключения антенного блока к блоку передачи, приёма, управления, обработки, сопряжения (БППУ); 7 – патч-корд с усилителем линии для подключения приёмника или излучателя на стойке к БППУ; 8 – кабель подключения поворотного устройства к БППУ.

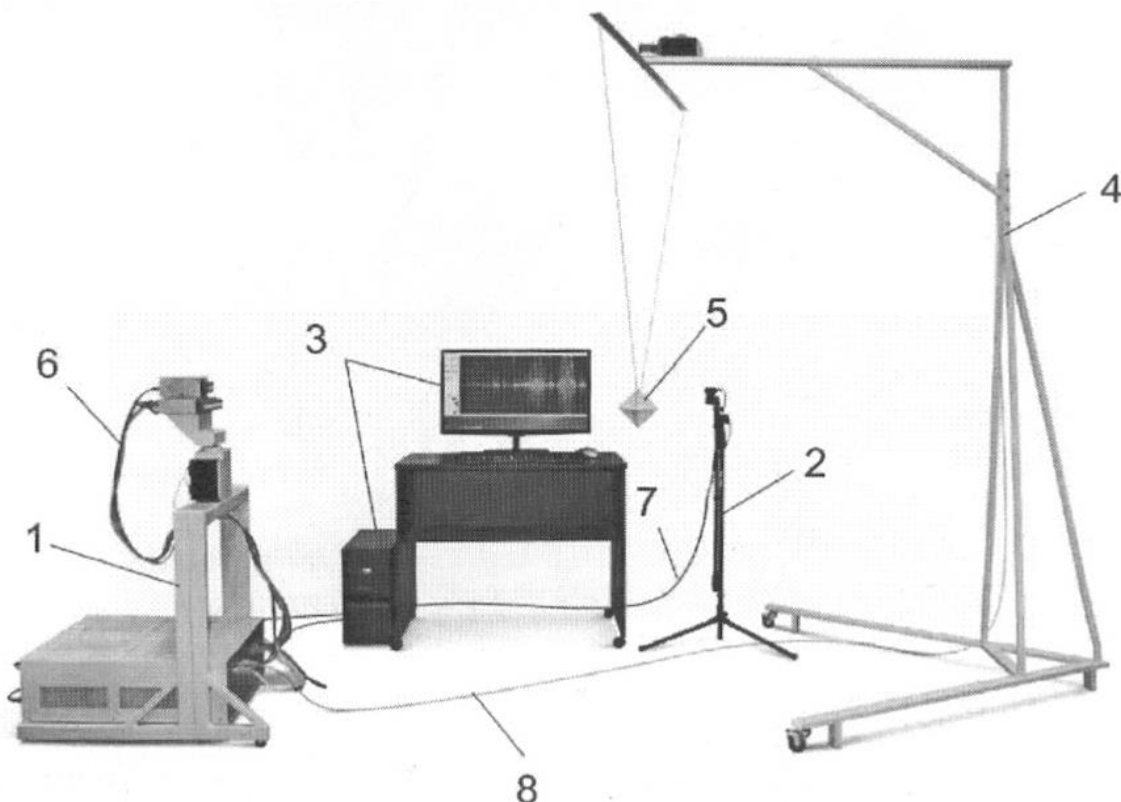


Рисунок 2.1 — Общий вид комплекса:

В верхней части радиолокационной стойки (рисунок 2.2) находится антенный блок, состоящий из блока приёмников и блока излучателей (АФАР). Под ним расположено поворотное устройство, обеспечивающее поворот антенного блока в горизонтальной плоскости влево и вправо на угол 90 градусов от нормали стойки. Разрешение в пределах одного оборота $\pi/1600$ радиан (*0,1125 градуса*) [6].

Расстояние между центрами излучения передатчиков составляет $8,7 \text{ мм} \pm 0,15 \text{ мм}$. Все передатчики находятся строго в одной плоскости с точностью порядка 20 – 40 микрон. Центр вращения антенны находится в плоскости излучателей между 8 и 9 излучателями.

БППУ обеспечивает [6]:

- Формирование сигналов антенного блока;
- Запись и обработку принятых сигналов;
- Передачу сигналов управления на поворотное устройство;
- Передачу накопленных данных от приёмника и поворотного устройства на блок визуализации;
- Управление углом поворота ФАР;
- Управление движением объекта (цели) обнаружения.

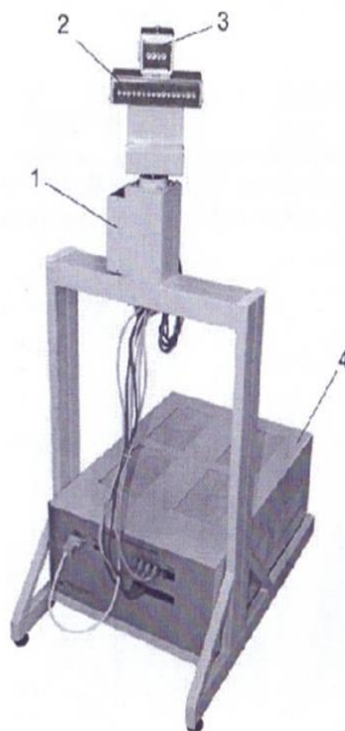


Рисунок 2.2 — Радиолокационная стойка в сборе:
 1 – поворотное устройство; 2 – антенный блок излучателей (АФАР);
 3 – антенный блок приёмников; 4 – БППУ.

2.2 Описание программного обеспечения «АФАР-16»

Программное обеспечение «АФАР-8 (АФАР-16) Построение диаграмм направленности» предназначено для управления передающей антенной, снятия диаграммы направленности и сохранения результатов для последующей обработки.

Данные при снятии диаграммы направленности накапливаются. В процессе накопления происходит корректировка определения расстояния между передающей и приёмной антенной. Соответственно происходит корректировка амплитуды для ранее снятых значений амплитуды по уточнённому расстоянию.

В качестве «правильного» расстояния между антеннами выбирается то, для которого амплитуда принятого сигнала была максимальна. Это значение сохраняется и для повторных измерений, либо корректируется, если абсолютная амплитуда основного лепестка новой ДН выше, чем амплитуда ранее снятой.

При запуске программы программа возвращает антенну в начальное положение, вращая её против часовой стрелки. После завершения движения антенны, открывается основное окно программы. Комплекс готов к работе.

На рисунке 2.3 представлен вид основного окна после запуска. На нем видно три столбца управления отдельными излучателями и дополнительные параметры.

Первый столбец «ВКЛ/ВЫКЛ» - позволяет включить используемые в работе излучатели. Галочкой отмечаются включённые. На рисунке 2.3 включён только первый излучатель.

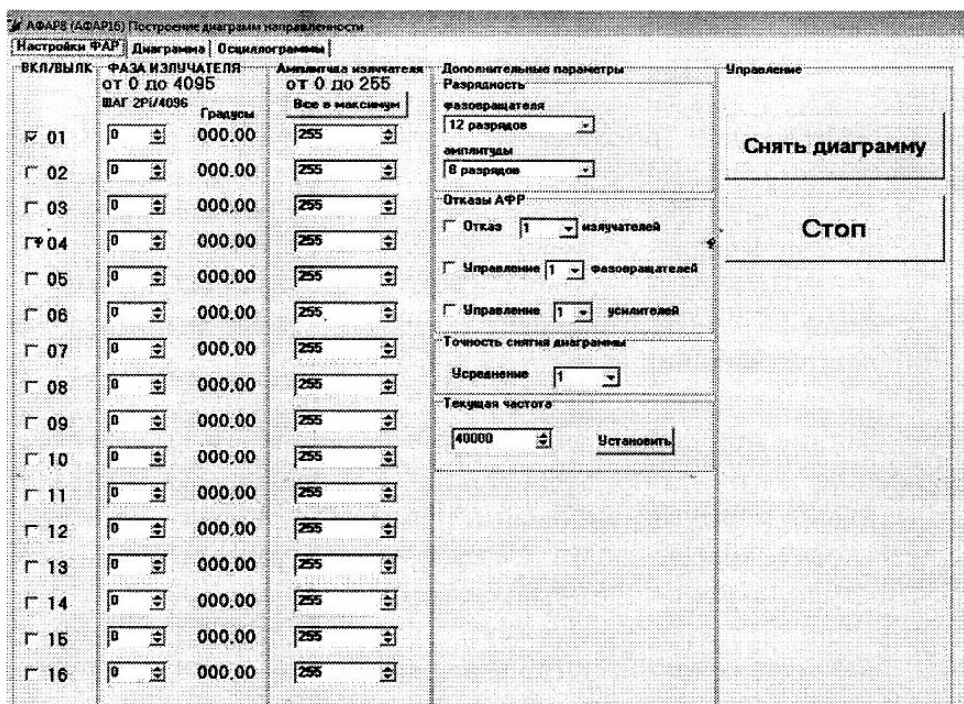


Рисунок 2.3 — Вид основного окна программы. Закладка «Настройки ФАР» [6]

Второй столбец «ФАЗА ИЗЛУЧАТЕЛЯ» – это фазовращатель для задания фаз каждому излучателю. Фазу можно задать только в виде целого числа. Диапазон изменения (в зависимости от выбранной разрядности) написан вверху столбца. На рисунке выбран 12-ти разрядный фазовращатель, поэтому дискретное положение фазы может принимать значения от 0 до 4095, а фаза возбуждения элемента может быть вычислена по формуле [6]:

$$\varphi = \frac{2\pi X}{2^M},$$

где X — значение, установленное в поле «фаза», M – порядок фазовращателя.

Рядом с окошком задания фазы находится контрольная надпись, переводящая набранное вами число в градусы с точностью 2 знака после запятой.

Третий столбец «Амплитуда излучателя». Вверху столбца написан допустимый диапазон изменения амплитуды. Ниже кнопка «все в максимум» позволяет установить все значения амплитуд в максимальное допустимое значение при текущей разрядности.

«Дополнительные параметры» - позволяют устанавливать «разрядность» фазовращателя и усилителя сигнала для всех излучателей сразу. При этом изменяются пределы изменения значений фаз и амплитуд. Например, при установке 3-х разрядного фазовращателя допустимыми значениями будут числа от 0 до 7, при этом шаг изменения фазы будет равен (45 градусов). Аналогично изменяется и разрядность амплитуды сигнала.

«Отказы ФАР» позволяют задать отказ случайным образом. Для моделирования отказа необходимо сначала установить количество отказавших элементов, затем поставить отметку «галочку» в соответствующем поле отказа. Отказавшие элементы будут выделены цветом. При этом текущее значение фазы и амплитуды при отказе будут зафиксированы, и их редактирование будет запрещено.

«Точность снятия диаграммы» реализует следующий алгоритм. Производится выбранное количество замеров (по умолчанию одно измерение). На ПЭВМ данные суммируются по всем замерам и обрабатываются как сумма с накоплением. Далее происходит поворот антенны на один шаг. В зависимости от выбранного усреднения изменяется время съема диаграммы. Без усреднения диаграмма снимается примерно за 130 секунд (1600 шагов).

«Текущая частота» позволяет установить частоту излучателей. Во всех лабораторных работах частота по умолчанию 40 кГц. Частоту можно установить с точностью до 1 герца. Для установки нового значения частоты необходимо в числовом поле набрать новое значение (от 38000 до 42000) и нажать кнопку «установить».

«Управление» содержит всего 2 кнопки «снять диаграмму» и «стоп». После установки всех параметров излучателей нажмите кнопку «снять диаграмму» для начала съёма диаграммы. «Стоп» - можно использовать для экстренного прерывания процесса съёма диаграммы.

На рисунке 3.4 изображено окно диаграммы с несколькими снятыми диаграммами.

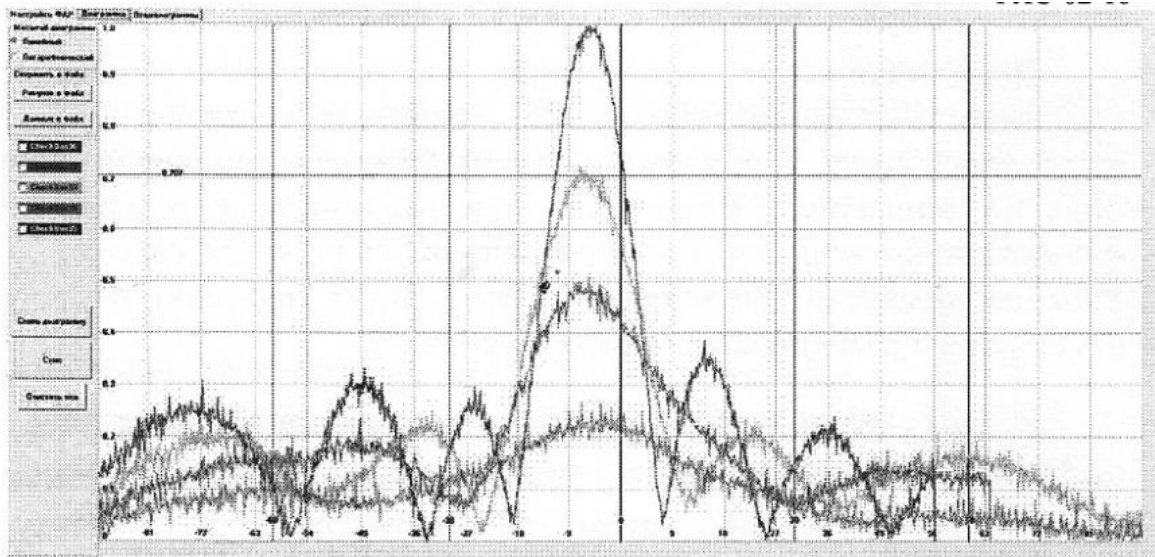


Рисунок 2.4 — Закладка «Диаграмма».

Амплитуды нормированы относительно максимальной. По оси X откладывается угол, по оси Y амплитуда от 0 до 1, либо от 0 дБ в логарифмическом масштабе. На этой закладке есть кнопки для сохранения данных и рисунков в файл. Имя файла соответствует текущей дате и времени. Всего на одном рисунке может быть до 5 сохраняемых диаграмм разного цвета. Последняя диаграмма рисуется серым цветом и не сохраняется. После чего все диаграммы стираются, и цвета используются повторно. Если необходимо сохранить (не удалить) диаграммы, отметьте нужный цвет сбоку на панели.

Кнопка «очистить всё» сбрасывает все диаграммы и данные, в том числе и расстояние между антеннами.

3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «Исследование характеристик фазированной антенной решётки при электронном сканировании»

3.1 Расчётное задание

1. Используя любой САПР (MatLab, SciLab, GNU Octave, MathCad и т.д.), рассчитайте диаграммы направленности ЛАР, которая состоит из:

- 2^х элементов под порядковыми номерами излучателей №7 и № 8 антенной головки;
- 4^х элементов – № 6, 7, 8 и 9;
- 8^и элементов – № 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 и 11;
- 16^и элементов – всей антенной решётки.

Расстояние между двумя соседними элементами составляет 8,7 мм, всего антенных элементов в решётке 16, частота излучения звуковой волны 40 кГц. Центр вращения антенны находится между 7 и 8 излучателями.

Постройте данные диаграммы на одном рисунке. На этом же рисунке постройте ДН излучающего элемента (см. приложение А).

2. Определите характерные параметры полученных диаграмм: ширина ДН по уровню -3дБ и уровень боковых лепестков. Внесите полученные данные в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты исследования по отклонению главного луча

Количество элементов	Расчётные данные		Измеренные данные	
	2 $\Theta_{0.5}$, град.	УБЛ, дБ	2 $\Theta_{0.5}$, град.	УБЛ, дБ
4				
8				
16				

Сделайте выводы, сопоставьте полученный результат с теорией.

3. Рассчитайте фазы 16 излучателей для заданных углов Θ_{max} отклонения главного лепестка в зависимости от варианта бригады (см. таблицу 3.2) по формуле (1.5).

Таблица 3.2 – Варианты значения направления луча

Номер бригады	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Θ_{max} , градусы	$\Theta_{max 1}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\Theta_{max 2}$	20	19	18	17	16	15	14	13	12
	$\Theta_{max 3}$	30	29	28	27	26	25	24	23	22

Постройте на одном рисунке диаграммы для каждого угла отклонения главного лепестка.

4. Определите характерные параметры диаграмм: угол максимума основного лепестка, ширину ДН по уровню -3дБ, направления и уровни боковых лепестков.

Внесите полученные данные в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты исследования по отклонению главного луча

	Расчётные данные			Измеренные данные		
	2 $\Theta_{0.5}$, град.	УБЛ, дБ	Θ_{max} , град.	2 $\Theta_{0.5}$, град.	УБЛ, дБ	Θ_{max} , град.
$\Theta_{max 1}$						
$\Theta_{max 2}$						
$\Theta_{max 3}$						

5. Проведите исследование зависимости уровня боковых лепестков крайнего луча от угла сканирования ФАР. Постройте данную зависимость, при этом на рисунке УБЛ крайнего луча не должен превышать -13,2 дБ. Выделите угол сканирования ФАР, при котором УБЛ крайнего луча равно -13 дБ, данный угол будет являться максимальным углом сканирования.

3.2 Порядок выполнения лабораторной работы

Студенту рекомендуется сначала провести измерения диаграмм, выполнив подпункты задания 1, 2, 4 – 6, а затем перейти к обработке экспериментальных данных по пунктам задания 3, 7 – 10.

1. Запустите программу АФАР8 (АФАР-16), которая находится на рабочем столе ПЭВМ. Ознакомьтесь с интерфейсом программы и её возможностями.

2. Снимите диаграммы направленности для трёх случайно выбранных излучателей, находящихся на разном расстоянии от центра вращения антенны (центр вращения антенны находится между 7 и 8 антенной). Для этого в столбце *ВКЛ./ВЫКЛ.* рисунка 2.3 галочка устанавливается только на том элементе, который будет измеряться. Сохраните полученные диаграммы, экспортируйте их в табличный редактор или иной САПР.

3. Постройте сохранённые диаграммы на одном рисунке. Усредните полученные диаграммы и также постройте на этом графике. Сравните полученные диаграммы и диаграмму, которую строили для одного элемента в расчётном задании. Объясните полученные различия, чем они могли быть вызваны.

Внесите величину ширины ДН и УБЛ усреднённой ДН излучающего элемента в таблицу 3.1.

4. Снимите экспериментальные диаграммы направленности антенной решётки, которая состоит из:

- 4^х элементов под № 6, 7, 8 и 9;
- 8^х элементов под № 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 и 11;
- 16^х элементов – всей антенной решётки.

Сохраните полученные диаграммы, экспортируйте их в табличный редактор или иной САПР.

5. Постройте сохранённые диаграммы на одном рисунке, используя скользящее среднее по трём отсчётам. Сравните полученные диаграммы в результате измерения с расчётными диаграммами. Сделайте выводы, объясните полученные результаты.

Определите характерные параметры полученных диаграмм: ширина ДН по уровню -3дБ и уровень боковых лепестков. Внесите полученные данные в таблицу 3.1.

Постройте на одном графике расчётные и экспериментальные зависимости на основании таблицы 3.1:

- ширины ДН по уровню -3дБ от количества излучателей антенны.
- уровня боковых лепестков от количества используемых излучателей.

Сравните экспериментальные данные с расчётными, объясните разницу в полученных результатах.

6. Проведите эксперименты для рассчитанных углов отклонения главного лепестка в зависимости от варианта бригады по рассчитанным фазам φ , предварительно переведя фазы [град.] в отсчёты для 12-ти разрядного фазовращателя по формуле:

$$X_n = \left\{ \frac{\Phi_n \cdot 2^{M-1}}{\pi} \right\},$$

где $\{.\}$ – оператор округления, $n = 0, 1, \dots, N-1$.

Сохраните полученные диаграммы, экспортируйте их в табличный редактор или иной САПР.

7. Постройте сохранённые диаграммы на одном рисунке. Сравните полученные диаграммы в результате измерения с диаграммами расчётными. Сделайте выводы, объясните полученные результаты.

Определите характерные параметры полученных диаграмм: ширина ДН по уровню -3дБ, направления и уровень боковых лепестков. Внесите полученные данные в таблицу 3.3.

Сравните экспериментальные данные с расчётными, объясните разницу в полученных результатах.

8. Проведите исследование зависимости уровня боковых лепестков крайнего луча от угла сканирования ФАР, пока УБЛ крайнего луча не станет равным -13,2 дБ.

9. Постройте зависимость уровня крайнего бокового лепестка от угла отклонения главного лепестка. Объясните его поведение. Ответьте на вопрос: «*Что можно сделать, чтобы увеличить сектор сканирования?*»

Сделайте выводы. Сравните экспериментальные данные с расчётными, объясните разницу в полученных результатах.

10. Полученные результаты расчётного задания и лабораторной работы сведите в отчёт. Подготовьтесь к вопросам по данной лабораторной работы и контрольным вопросам.

3.3 Контрольные вопросы

1. Что такое Антенна? Что такое ФАР?
2. Начертите структурную схему ФАР. Какие способы питания ФАР вы знаете.
3. От чего зависит ширина ДН, направление главного лепестка, появление дифракционных максимумов в видимой области?
4. Какие способы сканирования вы знаете? Объясните принцип электронного сканирования.
5. Поясните формулу (1.4), выведите её.
6. Какие факторы необходимо учитывать при проектировании ФАР с использованием электронного сканирования пространства.
7. Почему возможно использование акустического диапазона для изучения ФАР?

4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

«Исследование влияния искажения фазового распределения на диаграмму направленности фазированной антенной решётки»

4.1 Расчётное задание

1. Используя САПР, рассчитайте фазы Φ_n для 16 излучателей при различных углах отклонения, которые определяются в зависимости от номера бригады, см. таблицу 4.1. Расчёт производить с помощью формулы (1.5).

Таблица 4.1 – Варианты значения направления луча

Номер бригады	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Θ_{\max}	5^0	6^0	7^0	8^0	9^0	10^0	11^0	12^0	13^0	14^0	15^0

Расстояние между двумя соседними элементами составляет 8,7 мм, всего антенных элементов в решётке 16, частота излучения звуковой волны 40 кГц.

Рассчитайте отсчёты фазовращателя для всех излучателей для отклонения главного лепестка на заданный ранее угол для $M = 12$, $M = 8$, $M = 5$, $M = 2$ по формуле:

$$X_n = \left\{ \frac{\Phi_n \cdot 2^{M-1}}{\pi} \right\},$$

где $\{.\}$ – оператор округления, $n = 0, 1, \dots, N-1$.

Рассчитайте реальные фазы $\varphi_{рл}$, которые будут получаться с помощью M -разрядного фазовращателя, по формуле:

$$\varphi_{рл,n} = \frac{\pi X_n}{2^{M-1}},$$

Внесите полученные значения в таблицу 4.2, эти данные понадобятся для выполнения лабораторной работы.

Таблица 4.2 – Расчётные соотношения фаз для выполнения лабораторной работы

M	n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	2	$\varphi_{рс}$															
X																	
$\varphi_{рл}$																	
5	$\varphi_{рс}$																
	X																
	$\varphi_{рл}$																
8	$\varphi_{рс}$																
	X																
	$\varphi_{рл}$																
12	$\varphi_{рс}$																
	X																
	$\varphi_{рл}$																

Данную таблицу вставлять в отчёт необязательно, но подготовить и принести на лабораторную работу необходимо.

2. Рассчитайте диаграммы направленности линейной 16-ти элементной антенной решётки на основе таблицы 4.2 (для различных разрядностей фазовращателей).

Постройте данные диаграммы на одном рисунке. На этом же рисунке построьте ДН антенной решётки для заданного направления излучения и без учёта разрядностей фазовращателей $M = \infty$.

3. Определите характерные параметры полученных диаграмм: направление максимального излучения, ширина ДН по уровню -3дБ и уровень боковых лепестков. Внесите полученные данные в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты исследования по отклонению главного луча

	М	2	5	8	12	∞
Расчётные данные	Θ_{\max} , град.					
	$2\Theta_{0.5}$, град.					
	УБЛ, град.					
Измеренные данные	Θ_{\max} , град.					
	$2\Theta_{0.5}$, град.					
	УБЛ, град.					

4.2 Порядок выполнения лабораторной работы

Студенту рекомендуется сначала провести измерения диаграмм, выполнив подпункты задания 1, 2, 5 – 8, а затем перейти к обработке экспериментальных данных по пунктам задания 3, 4, 9 – 11.

1. Запустите программу АФАР-8 (АФАР-16), которая находится на рабочем столе ЭВМ. Ознакомьтесь с интерфейсом программы и её возможностями.

2. Установите значение поля «Усреднение» равное трём (при выполнении работы не изменять). Снимите диаграммы направленности антенной решётки для всех разрядностей на основании составленной таблицы 4.2. Сохраните полученные диаграммы, экспортируйте их в табличный редактор или иной САПР.

3. Постройте сохранённые диаграммы на одном рисунке. Сравните полученные диаграммы и расчётные диаграммы. Объясните полученные различия, чем они могли быть вызваны.

Внесите величины характерных параметров для каждой диаграммы: направление излучения максимума главного лепестка, ширины ДН по уровню -3 дБ и уровень боковых лепестков в таблицу 4.3.

4. Постройте зависимость ширины ДН главного лепестка и уровня бокового лепестка от разрядности фазовращателя на основании таблицы 4.3 для расчётных и экспериментальных данных. Сделайте выводы о влиянии разрядности фазовращателя на ДН. Сравните экспериментальные данные с расчётными, объясните разницу в полученных результатах.

Далее студентам необходимо выполнить анализ влияния неравномерности фазового распределения при разном СКО неравномерности. Для этого необходимо выполнить п. 5 – 9.

5. Сгенерируйте 16 случайных целых чисел (СЦЧ) с равномерным распределением в интервале (-1024; 1024). Просуммируйте полученные числа с ранее рассчитанными отсчётами фаз X для 12-ти разрядного фазовращателя (таблица 4.2 при $M = 12$). Оцените среднеквадратичную погрешность (СКП) выставления фазы [град.].

Пример (для ФАР-8). Фазы X для некоторого выбранного угла получились следующие: (0; 800; 1600; 2400; 3200; 4000; 704; 1504). Случайные числа: (100; -100; 500; -500; 1000; -1000; 300; -300).

При сложении ряда фаз с рядом случайных чисел получим: (100 [= 0 + 100]; 700 [= 800 - 100]; 2100 [= 1600 + 500]; 1900 [= 2400 - 500]; 104 [= (3200 + 1000)MOD4096]; 3000 [= 4000 - 1000]; 1004 [= 704 + 300]; 1204 [= 1504 - 300]).

6. Проведите эксперимент для полученных значений X . Сохраните полученные диаграммы, экспортируйте их в табличный редактор или иной САПР.

7. Разделите полученный выше ряд случайных чисел на 4, округлите до целых чисел. Просуммируйте получившийся ряд случайных чисел с фазами X для отклонения главного лепестка на заданный угол. Оцените СКП выставления фазы [град.]. Проведите эксперимент для полученных значений X .

Сохраните полученные диаграммы, экспортируйте их в табличный редактор или иной САПР.

8. Повторите п.7 поделив случайные числа из п.5 на 16 и 64.

9. Постройте сохранённые диаграммы в п. 6, 7 и 8 одном рисунке, используя скользящее среднее по трём отсчётам.

Определите характерные параметры диаграмм полученных в п. 6, 7 и 8: угол максимума основного лепестка, ширину ДН по уровню -3 дБ и уровни боковых лепестков. Полученные данные внесите в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Основные параметры ДН при исследовании влияния случайных искажений фазового распределения

	СЦЧ (-1024; 1024)	СЦЧ/4 (-256; 256)	СЦЧ/16 (-64; 64)	СЦЧ/64 (-16; 16)
Θ_{\max} , град.				
$2\Theta_{0.5}$, град.				
УБЛ, град.				

10. Сделайте выводы о влиянии случайного фазового распределения на ДН.

11. Полученные результаты расчётного задания и лабораторной работы сведите в отчёт. Подготовьтесь к вопросам по данной лабораторной работы и контрольным вопросам.

4.3 Контрольные вопросы

1. Что такое Антенна? Что такое ФАР?
2. Начертите структурную схему ФАР. Какие способы питания ФАР вы знаете.
3. От чего зависит ширина ДН, направление главного лепестка, появление дифракционных максимумов в видимой области?
4. Какие способы сканирования вы знаете? Объясните принцип электронного сканирования.
5. Поясните формулу (1.4), выведите её.
6. Какие факторы необходимо учитывать при проектировании ФАР с использованием электронного сканирования пространства.
7. Почему возможно использование акустического диапазона для изучения ФАР?
8. Почему важно учитывать разрядность фазовращателей?
9. Начертите, какой вид имеют ошибки дискретизации фазы. Какие два предельных случая положения элементов на пилообразной кривой возможны? Дайте краткую характеристику данным случаям.
10. Как влияет ошибка дискретизации на ширину ДН, направление главного лепестка, уровень боковых лепестков?
11. Какой разрядности на ваш взгляд будет достаточно для нормальной работы ФАР?

5 ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТА №3

«Исследование влияния искажения амплитудного распределения и частоты излучения на диаграмму направленности фазированной антенной решётки»

5.1 Расчётное задание

1. Используя САПР, рассчитайте для N элементной антенной решётки следующие амплитудные распределения токов:

- Косинус на пьедестале при $\delta = 0$;
- Косинус на пьедестале при $\delta = 0,25$;
- Косинус на пьедестале при $\delta = 0,5$;
- Косинус на пьедестале при $\delta = 0,75$;
- Косинус на пьедестале при $\delta = 1$;
- Дольф-Чебышева для УБЛ = - 18 дБ;
- Дольф-Чебышева для УБЛ = - 23 дБ.

Параметр N – количество элементов в антенной решётке зависит от номера варианта (см. таблицу 5.1).

Таблица 5.1 – Вариант задания

Номер варианта	1	2	3	4	5
N	16	15	14	13	12

Расчёт производить с помощью формул (1.6) и (1.7) или (1.8), нормированные значения токов умножьте на 127 (половина максимального тока лабораторного стенда). Расстояние между двумя соседними элементами составляет 8,7 мм, всего антенных элементов в решётке N, частота излучения звуковой волны 40 кГц.

Постройте на одном графике полученные амплитудные распределения. Проанализируйте данный график. По полученным распределениям сформулируйте основные характеристики соответствующих диаграмм направленностей (УБЛ, ШДН, КНД).

2. Рассчитайте диаграммы направленности линейной N элементной антенной решётки на основе полученных распределений тока. Постройте данные диаграммы на одном рисунке. *Совпали ли результаты с вашим предположением, вынесенном п.1 задания?*

3. Определите характерные параметры полученных диаграмм: ширину ДН по уровню -3дБ и уровень боковых лепестков. Внесите полученные данные в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты исследования по влиянию амплитудного распределения

Амплитудное распределение	Расчётные данные		Измеренные данные	
	$2\Theta_{0.5}$, град.	УБЛ, дБ	$2\Theta_{0.5}$, град.	УБЛ, дБ
Косинус на пьедестале $\delta = 0$				
Косинус на пьедестале $\delta = 0,25$				
Косинус на пьедестале $\delta = 0,5$				
Косинус на пьедестале $\delta = 0,75$				
Косинус на пьедестале $\delta = 1$				
Дольф-Чебышева для УБЛ = -18 дБ				
Дольф-Чебышева для УБЛ = -23 дБ				

4. Используя САПР, рассчитайте диаграммы направленности линейной 16-ти элементной антенной решётки с равномерным амплитудным распределением при излучении на следующих частотах:

- 38 кГц;
- 40 кГц;
- 42 кГц.

Постройте данные диаграммы на одном рисунке.

5. Повторите расчёт диаграмм на данных частотах при отклонении главного лепестка диаграммы на 7 градусов, для фазовых соотношений рассчитанных на частоте 40 кГц. Рассчитайте отсчёты 12-ти разрядного фазовращателя для всех излучателей для отклонения главного лепестка на заданный ранее угол при $M = 12$ по формуле:

$$X_n = \left\{ \frac{\Phi_n \cdot 2^{M-1}}{\pi} \right\},$$

где $\{.\}$ – оператор округления, $n = 0, 1, \dots, N-1$.

Постройте полученные диаграммы направленности на одном рисунке.

6. Определите характерные параметры полученных диаграмм в пп. 4 и 5: ширину ДН по уровню -3дБ и уровень боковых лепестков. Внесите полученные данные в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты исследования по влиянию частоты излучения

Частота, кГц	Расчётные данные						Измеренные данные					
	$\Theta_{\max} = 0^0$			$\Theta_{\max} = 7^0$			$\Theta_{\max} = 0^0$			$\Theta_{\max} = 7^0$		
	$2\Theta_{0,5}$, град.	УБЛ, дБ	Θ_{\max} , град.	$2\Theta_{0,5}$, град.	УБЛ, дБ	Θ_{\max} , град.	$2\Theta_{0,5}$, град.	УБЛ, дБ	Θ_{\max} , град.	$2\Theta_{0,5}$, град.	УБЛ, дБ	Θ_{\max} , град.
38												
40												
42												

5.2 Порядок выполнения лабораторной работы

Студенту рекомендуется сначала провести измерения диаграмм, то есть выполнить подпункты задания 1, 2, 5 – 8.

1. Запустите программу АФАР-8 (АФАР-16), которая находится на рабочем столе ПЭВМ. Ознакомьтесь с интерфейсом программы и её возможностями.

2. Установите значение поля «Усреднение» равное трём (при выполнении работы не изменять). Снимите диаграммы направленности антенной решётки для всех рассчитанных в расчётном задании амплитудных распределений для N элементной антенной решётки. Сохраните полученные диаграммы, экспортируйте их в табличный редактор или иной САПР.

3. Постройте сохранённые диаграммы на одном рисунке. Сравните полученные диаграммы и расчётные диаграммы. Объясните полученные различия, чем они могли быть вызваны. Сравните влияние двух оконных функций с разными параметрами на диаграмму направленности.

Внесите величины характерных параметров для каждой диаграммы: ширину ДН по уровню -3 дБ и уровень боковых лепестков в таблицу 5.4.

Далее студентам необходимо выполнить анализ влияния неравномерности амплитудного распределения при разном СКО неравномерности. Для этого необходимо выполнить пп. 4 – 8

4. Выберите любое амплитудное распределение. Сгенерируйте N случайных целых чисел (СЦЧ) с равномерным распределением в интервале $(-64; 64)$. Просуммируйте полученные числа с выбранным амплитудным распределением. Оцените среднеквадратичную погрешность (СКП) выставления амплитуды.

5. Проведите эксперимент для полученного после суммирования амплитудного распределения. Сохраните полученные диаграммы, экспортируйте их в табличный редактор или иной САПР.

6. Разделите полученный выше ряд случайных чисел на 2, округлите до целых чисел. Просуммируйте полученные числа с выбранным амплитудным распределением. Оцените СКП выставления амплитуды.

Сохраните полученные диаграммы, экспортируйте их в табличный редактор или иной САПР.

7. Повторите п.6 поделив случайные числа полученные в п.4 на 4 и 8.

8. Постройте сохранённые диаграммы в пп. 5, 6 и 7 на одном рисунке.

Определите характерные параметры диаграмм полученных в пп. 5, 6 и 7: ширину ДН по уровню -3дБ и уровни боковых лепестков. Полученные данные внесите в таблицу 5.4.

Таблица 5.4 – Основные параметры ДН при исследовании влияния случайных искажений фазового распределения

	СЦЧ $(-64; 64)$	СЦЧ/4 $(-16; 16)$	СЦЧ/16 $(-4; 4)$	СЦЧ/64 $(-1; 1)$
$2\Theta_{0.5}, \text{град.}$				
УБЛ, град.				

9. Сделайте выводы о влиянии разброса параметров амплитудного распределения на ДН.

10. Снимите диаграммы направленности 16-ти элементной линейной антенной решётки на частотах 38 кГц, 40 кГц и 42 кГц. Сохраните полученные диаграммы, экспортируйте их в табличный редактор или иной САПР.

11. Снимите диаграммы направленности 16-ти элементной линейной антенной решётки на частотах 38 кГц, 40 кГц и 42 кГц при заданном отклонении луча ДН, с помощью рассчитанных в п.5 расчётного задания фаз. Сохраните полученные диаграммы, экспортируйте их в табличный редактор или иной САПР.

12. Постройте сохранённые диаграммы в пп. 10 и 11 на одном рисунке.

13. Определите характерные параметры диаграмм полученных в пп. 10 и 11: направление максимума излучения, ширину ДН по уровню -3дБ и уровни боковых лепестков. Полученные данные внесите в таблицу 5.3. Сделайте выводы о влиянии разброса частоты излучения на ДН.

14. Полученные результаты расчётного задания и лабораторной работы сведите в отчёт. Подготовьтесь к вопросам по данной лабораторной работы и контрольным вопросам.

5.3 Контрольные вопросы

1. Что такое Антенна? Что такое ФАР?
2. Начертите структурную схему ФАР. Какие способы питания ФАР вы знаете.
3. От чего зависит ширина ДН, направление главного лепестка, появление дифракционных максимумов в видимой области?
4. Какие способы сканирования вы знаете? Объясните принцип электронного сканирования.
5. Какие факторы необходимо учитывать при проектировании ФАР с использованием электронного сканирования пространства.
6. Почему возможно использование акустического диапазона для изучения ФАР?
7. Какой разрядности на ваш взгляд будет достаточно для нормальной работы ФАР?
8. Зачем намерено вводят неравномерность амплитудного распределения? Засчёт чего добиваются уменьшение ширины ДН?
9. Как влияют случайные амплитудные ошибки на ДН? Какие ошибки более существенны: в амплитуде или фазе? Попробуйте объяснить почему.
10. Как влияет изменение частоты излучения на ДН, в частности ширину ДН, УБЛ, направление излучения, если наклонение главного лепестка равно и не равно 0^0 ?

6 Список рекомендуемой литературы

- 1 Гошин Г.Г. Устройства СВЧ и антенны. Часть 2. Антенны: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 145 с. URL: <https://edu.tusur.ru/publications/736c> (Дата обращения: 10.01.2023)
- 2 Устройства СВЧ и антенны. Проектирование ФАР: учебник для вузов/ Д.И. Воскресенский, В.И. Степаненко, В.С. Филиппов и др. Под.ред. Д.И. Воскресенского. 3-е изд. доп. и перераб. — М.: Радиотехника, 2003. — 632с. (стр. 5 — 22) URL: <http://en.bookfi.net/book/1503194> (Дата обращения: 10.01.2023)
- 3 Шифрин Я.С. Антенны: Учебное пособие. – Издательство академии "ВИРТА", 1976. – 407с. (стр. 143 – 156) URL: <http://www.radioscanner.ru/files/antennas/file11438/> (Дата обращения: 10.01.2023)
- 4 Хансен Р.С. Фазированные антенные решётки. Второе издание. / Р.С. Хансен; пер. с англ. под ред. А.И. Санина. – М.: Техносфера, 2012. - 560 с.
- 5 Москалев Д.В. Влияние случайных ошибок возбуждения и положения излучателей на характеристики многогранной антенной решётки/ Москалев Д.В.//доклады БГУИР.— 2012. — №1 (63) URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-sluchaynyh-oshibok-vozbuzhdeniya-i-polozheniya-izluchateley-na-harakteristiki-mnogogrannoy-antennnoy-reshetki> (Дата обращения: 01.10.2022)
- 6 Рекомендации по проведению экспериментов на учебно-лабораторном комплексе «Радиолокационные станции обнаружения подвижных объектов на базе АФАР» РЛС-02-16. — 2018 г., 51 с.

Перечень используемых сокращений

АФР	– амплитудно-фазовое распределение (токов)
БППУ	– блок передачи, приёма, управления, обработки, сопряжения
ДН	– диаграмма направленности
КНД	– коэффициент направленного действия
ЛАР	– линейная антенная решётка
УБЛ	– уровень боковых лепестков
ФАР	– фазированная антенная решётка
ФВ	– фазовращатель
ЭМ	– электромагнитная (волна)

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

Диаграмма направленности излучателя. Функция «pattern_radiator»

```
function dn=pattern_radiator(fi)
% fi – входной массив углов
% ДН единичного излучателя
% Ввод паспортных данных
ff=-pi/2:pi/18:pi/2;
d=[-20 -16.5 -13.4 -10.1 -7.5 -5 -3 -1.5 -0.51 0 -0.51 -1.5 -3 -5 -7.5 -10.1 -13.4 -16.5 -20];
dm=10.^(d/20);
dn=interp1(ff,dm,fi,'spline'); % Слайн-интерполяция паспортных данных
return
```