

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники

К.Д. Зайков, Ф.Н. Захаров

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСКАЖЕНИЯ ФАЗОВОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА ДИАГРАММУ НАПРАВЛЕННОСТИ
ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ**

Методическое указание по лабораторной работе для студентов
радиотехнических специальностей

Томск

2023

УДК 621.396.677

ББК 32.845

З 17

Рецензент:

Аникин А.С., доцент кафедры радиотехнических систем ТУСУР, кандидат
технических наук

Зайков, Кирилл Денисович

З 17 Исследование влияния фазовращателей на диаграмму направленности фазированной антенной решётки: методическое указание по лабораторной работе для студентов радиотехнических специальностей / К.Д. Зайков, Ф.Н. Захаров — Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 21 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 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 № 3 от 27 октября 2022 г.

УДК 621.396.677

ББК 32.845

© Зайков К.Д., Захаров Ф.Н., 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
2 Описание лабораторного макета	12
2.1 Общий вид макета	12
2.2 Описание программного обеспечения «АФАР-16».....	13
3 Практическая часть лабораторной работы.....	16
3.1 Расчётное задание.....	16
3.2 Порядок выполнения лабораторной работы.....	17
4 Контрольные вопросы	19
5 Список рекомендуемой литературы	20
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Диаграмма направленности излучателя. Функция «pattern_radiator».....	21

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.

Целью лабораторная работа «Исследование влияния фазовращателей на диаграмму направленности фазированной антенной решётки» являются:

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

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

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 под ними понимают амплитудной диаграмме (модуль ДН). Диаграмма направленности характеризует возможность антенны концентрировать энергию в заданном угловом секторе в пространстве.

Основные характеристики диаграммы направленности антенны рассмотрим на примере амплитудной диаграммы направленности, приведённой на рисунке 1.1.

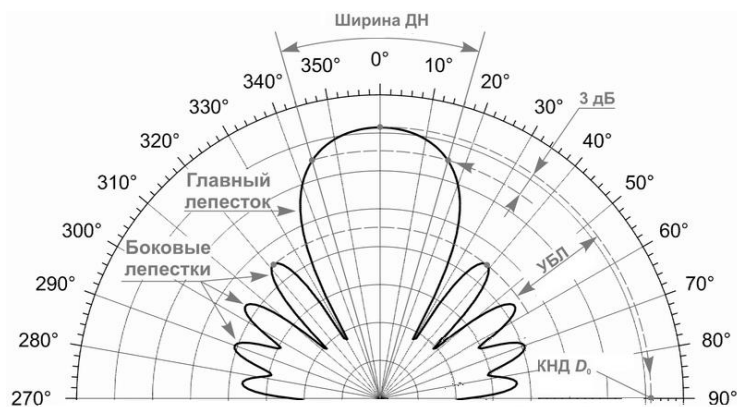


Рисунок 1.1 – Пример амплитудной диаграммы направленности

Диаграмма направленности антенны характеризуется такими параметрами, как:

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

Ширина диаграммы антенны отсчитывается на некотором 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]. Часто под КНД понимают не угловую зависимость, а максимальное значение, 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 изотропной 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, учитывающий расположение антенных элементов.

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

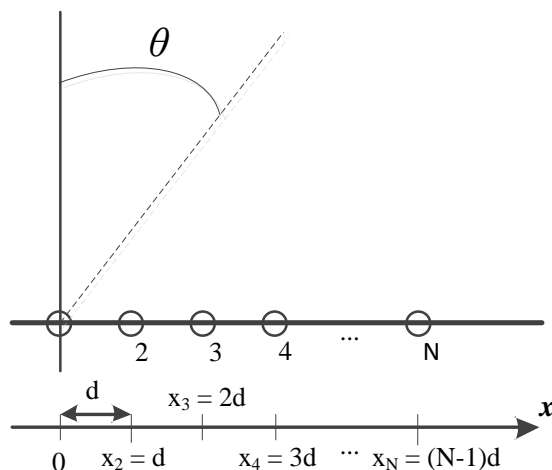


Рисунок 1.2 – Геометрия линейной антенной решётки

Множитель направленности ЛАР, 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 $\psi(\theta) = 0.5Nkd \sin\left(\theta - \frac{\Delta\varphi}{kd}\right)$; $\Delta\varphi$ — разность фаз между соседними элементами.

Характеристики диаграммы направленности ЛАР

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 фазы питающих токов линейно, при количестве излучателей $N > 9$ УБЛ будет составлять 13,26 дБ.

Обобщённая структурная схема линейной ФАР

Структурная схема ФАР представлена на рисунке 1.2, она состоит из усилителей (У), фазовращателей (ФВ) и сумматора.

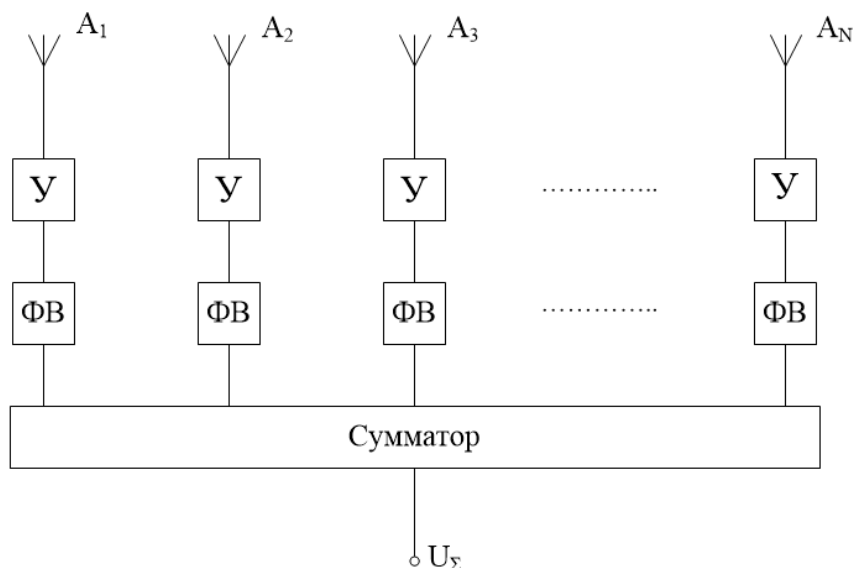


Рисунок 1.3 — Структурная схема ФАР

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 $\Delta\varphi$.

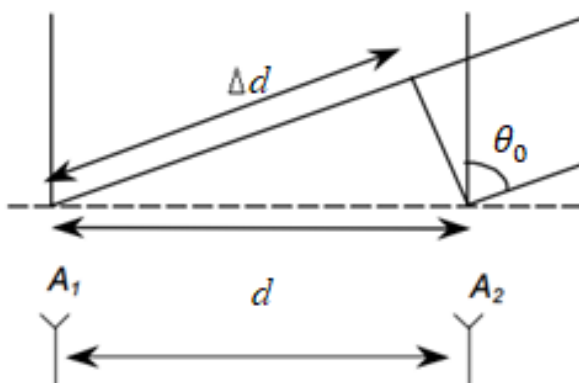


Рисунок 1.4 – К пояснению получения фазового сдвига на двухэлементной ЛАР, если сигнал приходит с направления θ_0

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 излучения 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 оставшийся фазовый сдвиг (см. рисунок 1.5).

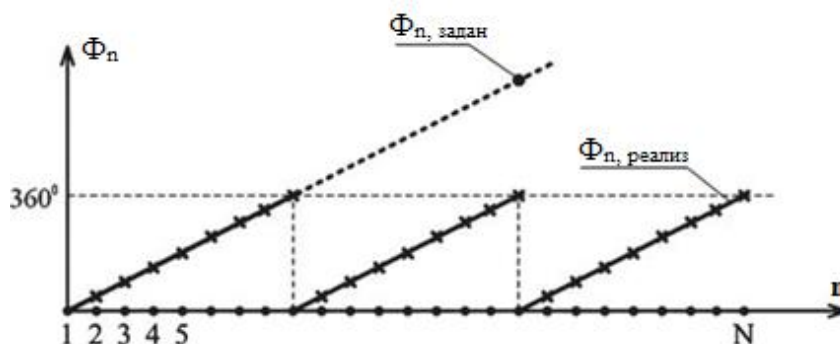


Рисунок 1.5 — Явление сброса фазы

Характеристики диаграммы направленности при электрическом сканировании

При смещении максимума излучения с направления нормали главный лепесток 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:

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

где $L_\varepsilon = (N-1)d \cos(\theta_0)$ – 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).

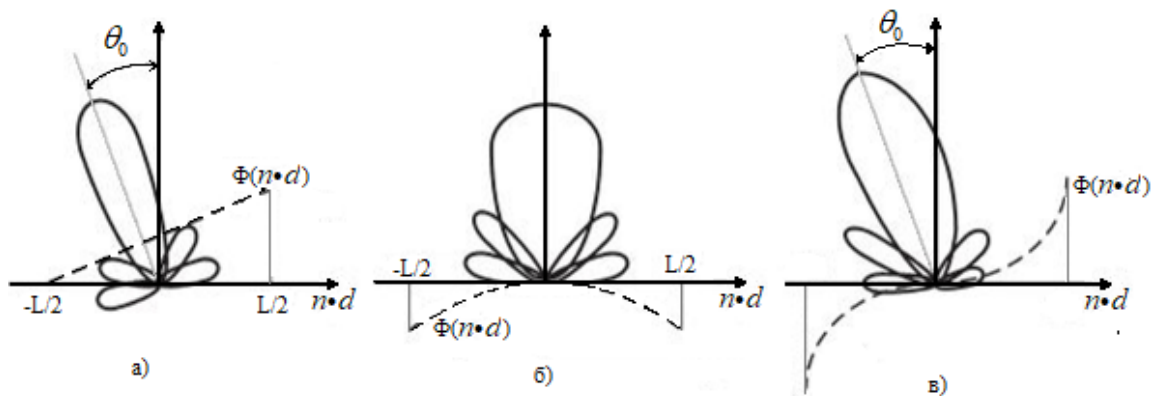


Рисунок 1.6 – Влияние фазовых искажений на форму ДН, если фаза изменяется по:
 а – линейному закону; б – квадратичному закону; в – кубическому закону

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.

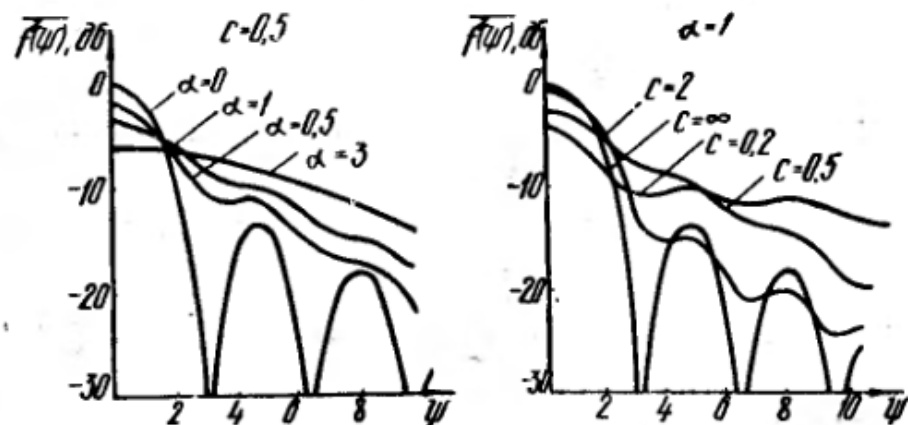


Рисунок 1.7 — Средние диаграммы направленности при случайной фазе

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).

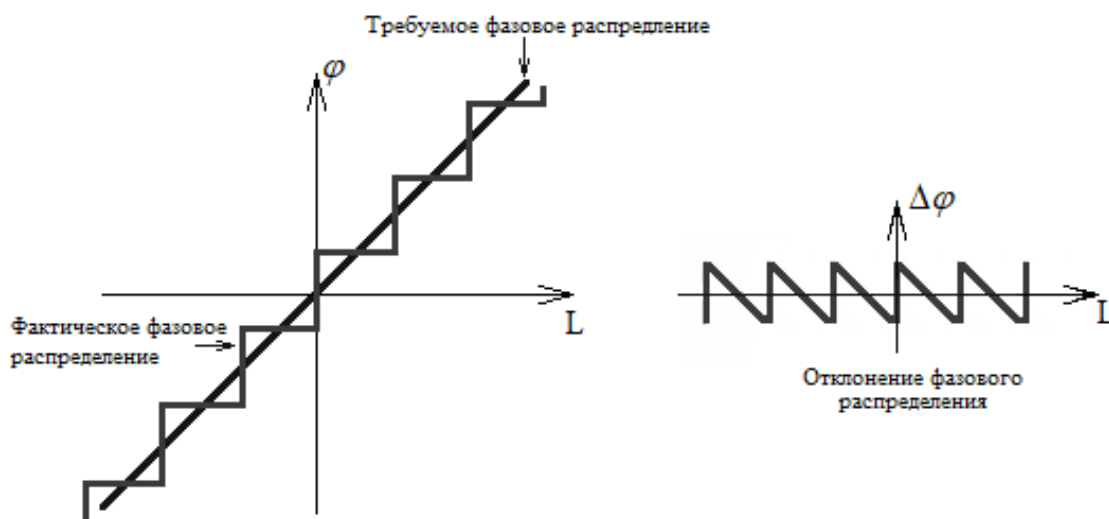


Рисунок 1.8 — Ошибки дискретизации фазы

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.

2 Описание лабораторного макета

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 вследствие существенного затухания 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.

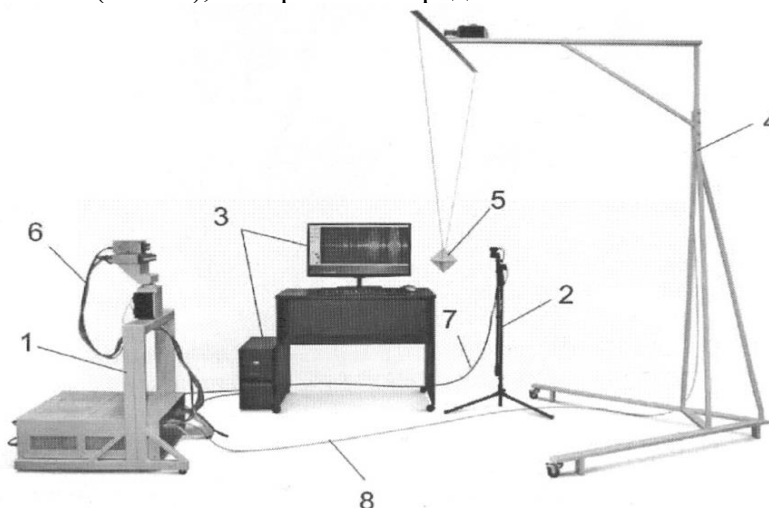


Рисунок 2.1 — Общий вид комплекса:

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.

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.

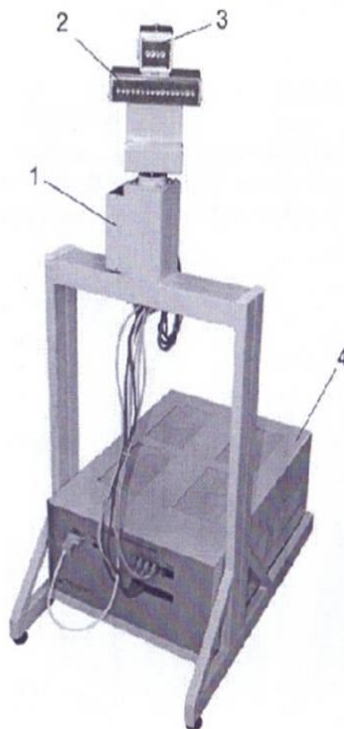


Рисунок 2.2 — Радиолокационная стойка в сборе:
1 – поворотное устройство; 2 – антенный блок излучателей (АФАР);
3 – антенный блок приёмников; 4 – БППУ.

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 максимальной. 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.

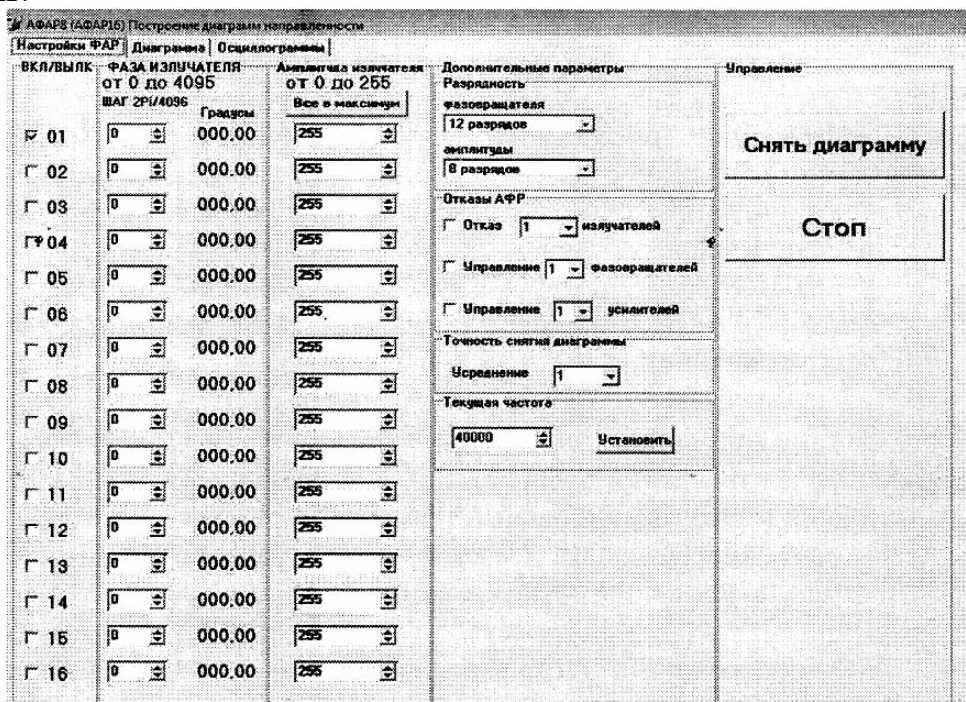


Рисунок 2.3 — Вид основного окна программы. Закладка «Настройки ФАР» [6]

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 съёма диаграммы. Без усреднения диаграмма снимается примерно за 130 секунд (1600 шагов).

«Текущая частота» позволяет установить частоту излучателей. Во всех лабораторных работах частота по умолчанию 40кГц. 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.

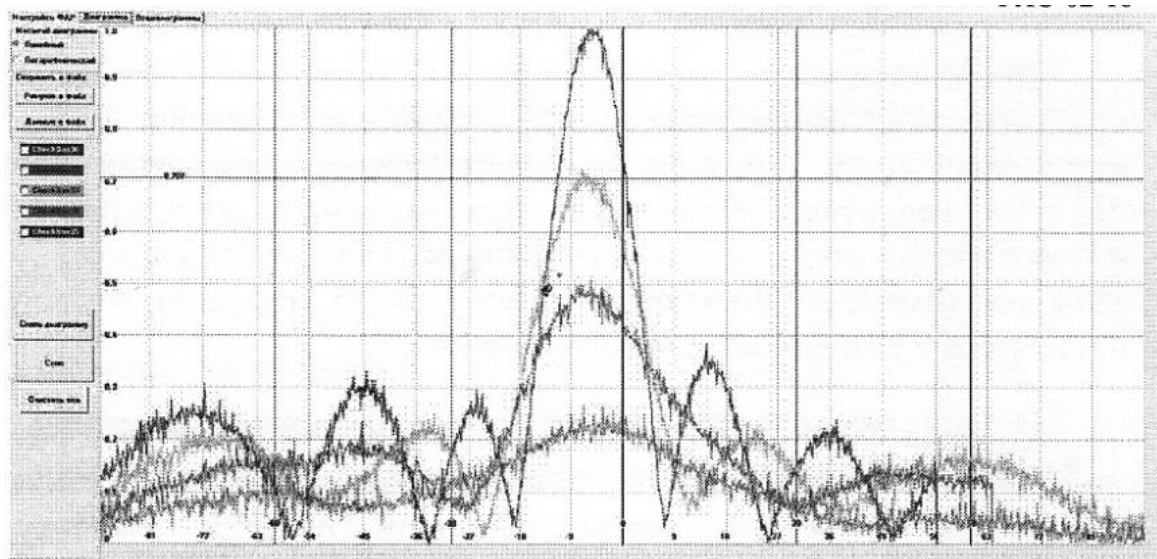


Рисунок 2.4 — Закладка «Диаграмма».

Амплитуды нормированы относительно максимальной. По оси X откладывается угол, по оси Y амплитуда от 0 до 1, либо от 0дБ 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 удалять) диаграммы, отметьте нужный цвет сбоку на панели.

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

3 Практическая часть лабораторной работы

3.1 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 3.1. Расчёт производить с помощью формулы (1.5).

Таблица 3.1 – Варианты значения направления луча

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

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 3.2, эти данные понадобятся для выполнения лабораторной работы.

Таблица 3.2 – 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 3.2 (для различных разрядностей фазовращателей).

Постройте данные диаграммы на одном рисунке. На этом же рисунке постройте 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 3.3.

Таблица 3.3 – 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.					

3.2 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 5.2. 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 3.3.

4. Постройте зависимость ширины ДН главного лепестка и уровня бокового лепестка от разрядности фазовращателя на основании таблицы 3.3 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 5.2 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 3.4.

Таблица 3.4 – 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 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 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: 10.01.2023)
- 6 Рекомендации по проведению экспериментов на учебно-лабораторном комплексе «Радиолокационные станции обнаружения подвижных объектов на базе АФАР» РЛС-02-16. — 2018 г., 51 с.

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
```