

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники

К.Д. Зайков, Ф.Н. Захаров

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ
РЕШЁТКИ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ СКАНИРОВАНИИ**

Методическое указание по лабораторным работам 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 характеристик фазированной антенной решётки при электронном сканировании: методическое указание по лабораторной работе для студентов радиотехнических специальностей / К.Д. Зайков, Ф.Н. Захаров — Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 19 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
2 Описание лабораторного макета	10
2.1 Общий вид макета	10
2.2 Описание программного обеспечения «АФАР-16».....	11
3 Практическая часть лабораторной работы.....	14
3.1 Расчётное задание.....	14
3.2 Порядок выполнения лабораторной работы.....	15
4 Контрольные вопросы	17
5 Список рекомендуемой литературы	18
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Диаграмма направленности излучателя. Функция «pattern_radiator».....	19

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 лабораторной работы «Исследование фазированной антенной решётки» 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.

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.

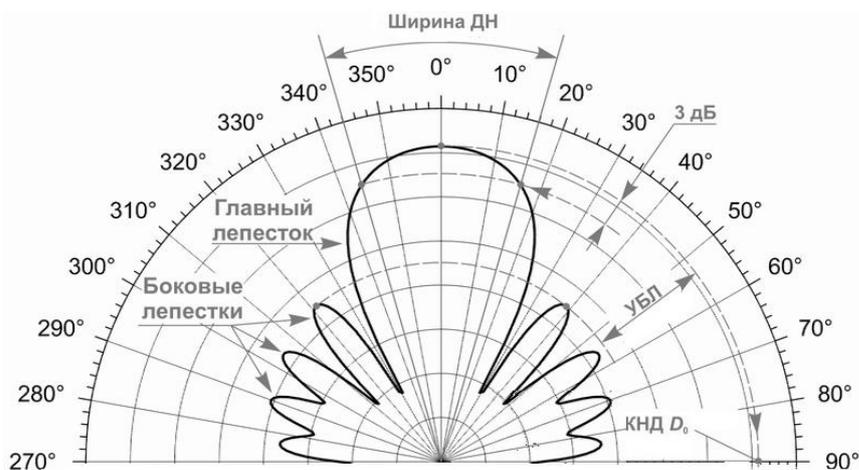


Рисунок 1.1 – Пример амплитудной диаграммы направленности

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]. 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) состоящей из N излучателей, как показано на рисунке 1.2.

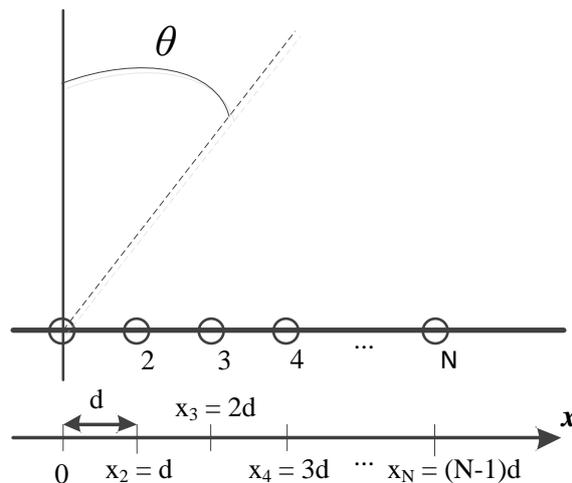


Рисунок 1.2 – Геометрия линейной антенной решётки

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 ЛАР; $k = 2\pi/\lambda$ – 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 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 1.3, она состоит из усилителей (У), фазовращателей (ФВ) и сумматора.

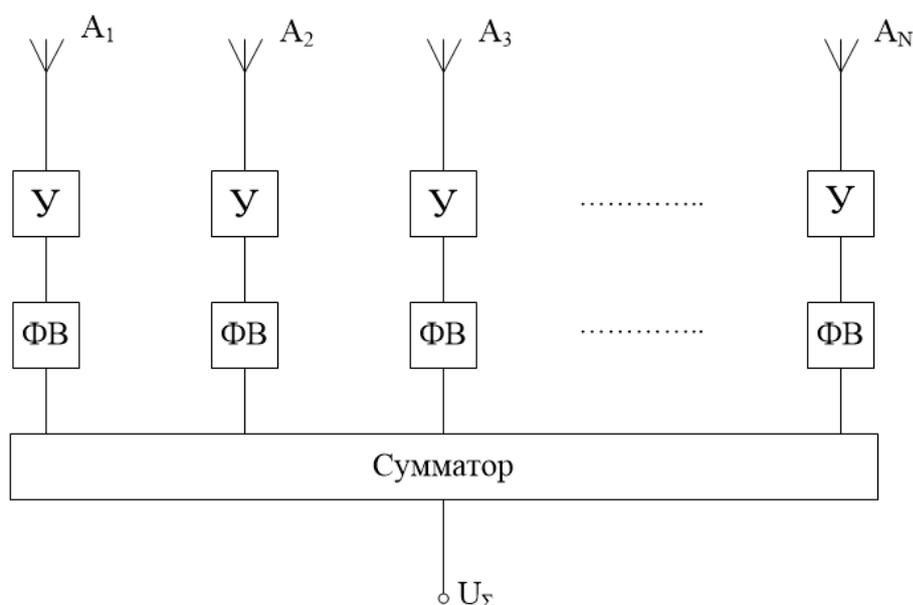


Рисунок 1.3 — Структурная схема ФАР

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 $\Delta\varphi$.

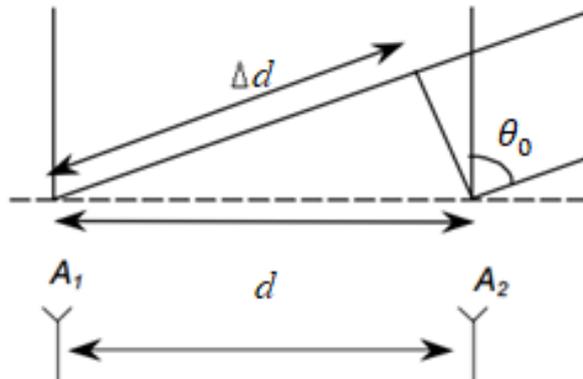


Рисунок 1.4 – К пояснению получения фазового сдвига на двухэлементной ЛАР, если сигнал приходит с направления θ_0

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 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 оставшееся фазовый сдвиг (см. рисунок 1.5).

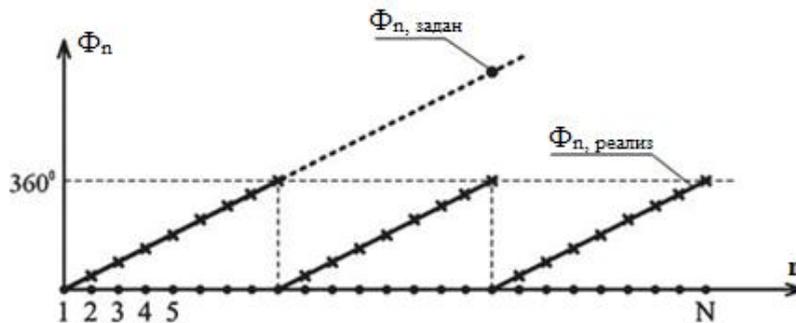


Рисунок 1.5 — Явление сброса фазы

Характеристики диаграммы направленности при электрическом сканировании

При смещении максимума излучения с направления нормали 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*.

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.

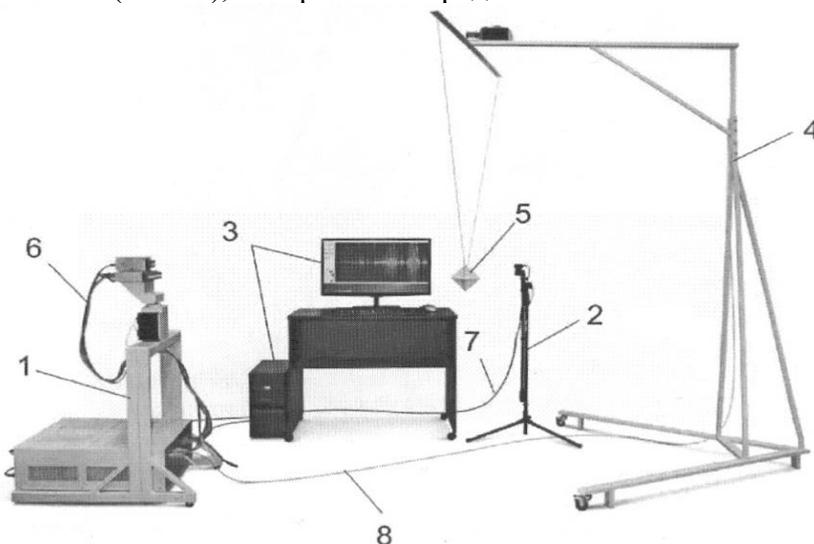


Рисунок 2.1 — Общий вид комплекса:

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.

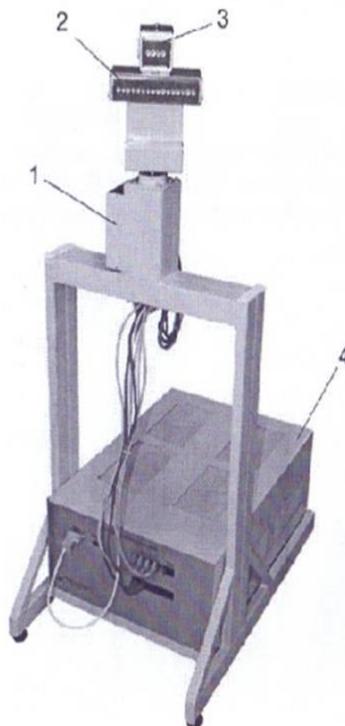


Рисунок 2.2 — Радиолокационная стойка в сборе:
1 – поворотное устройство; 2 – антенный блок излучателей (АФАР);
3 – антенный блок приёмников; 4 – БППУ.

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.

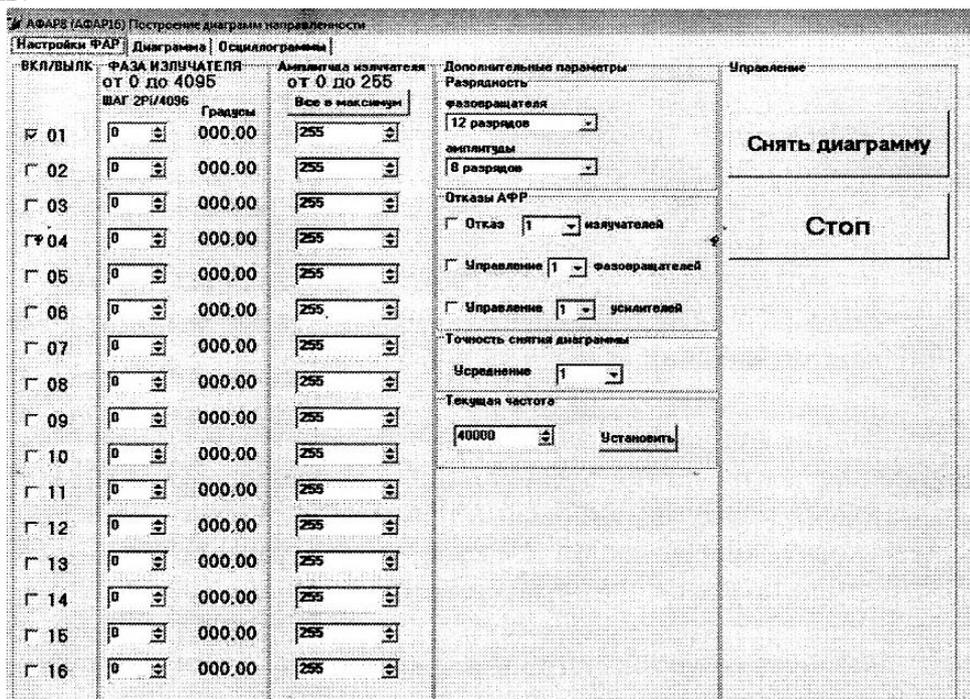


Рисунок 2.3 — Вид основного окна программы. Закладка «Настройки ФАР» [6]

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 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.

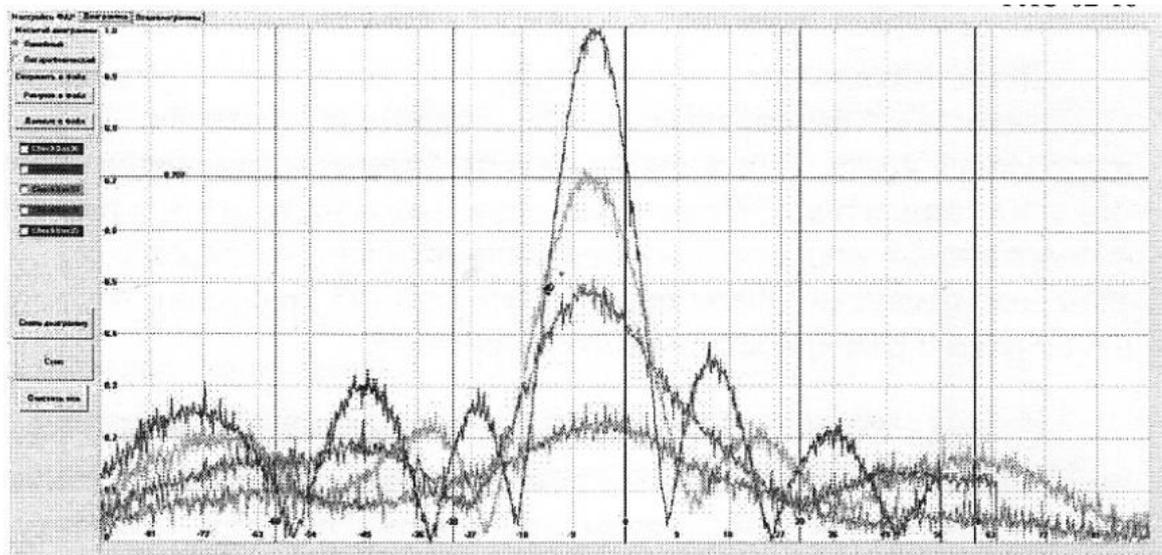


Рисунок 2.4 — Закладка «Диаграмма».

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

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

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 (2.3), выведите её.
6. Какие факторы необходимо учитывать при проектировании ФАР с использованием электронного сканирования пространства.
7. Почему возможно использование акустического диапазона для изучения 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 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
```