

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління  
(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
(рівень вищої освіти)

Система радіолокаційного сканування на базі Arduino  
(тема)

Виконав: здобувач IV року навчання,  
групи КІУКІ-21-9

Кузьменко А.М.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма

Комп'ютерна інженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник ст. викладач Мірошник А.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Чумаченко С.В.  
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія  
(шифр і назва)

Тип програми Освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерна інженерія  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Кузьменко Анатолію Миколайовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Система радіолокаційного сканування на базі Arduino

затверджена наказом по університету від "21" 05 2025 р. № 403Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 12.06.2025

3. Вихідні дані до роботи (проекту) \_\_\_\_\_

Технічне завдання на розробку системи радіолокаційного сканування

Специфікації мови програмування Java

Специфікації мікроконтролера AVR ATmega328P

Інтегроване середовище розробки програмного забезпечення Processing

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі \_\_\_\_\_

Системи радіолокаційного сканування: теоретичні аспекти та аналіз існуючих рішень

Реалізація апаратної складової системи

Реалізація програмного забезпечення системи

Реалізація макетного зразка та результати дослідної експлуатації

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Презентація (19 слайдів)

---

---

---

---

---

6. Консультанти розділів роботи (проекту)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

7. Дата видачі завдання 06.05.2025

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи (проекту)	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Видача теми проекту, узгодження і затвердження	06.05.2025 - 10.05.2025	
2	Аналіз проблемної галузі, постановка задачі, вибір інструментальних засобів	10.05.2025 - 17.05.2025	
3	Розробка моделі системи	17.05.2025 - 24.05.2025	
4	Розробка апаратної платформи системи	24.05.2025 - 31.05.2025	
5	Розробка програмного забезпечення системи	31.05.2025 - 05.06.2025	
6	Проведення випробування системи	05.06.2025 - 07.06.2025	
7	Оформлення пояснювальної записки	07.06.2025 - 10.06.2025	
8	Перевірка виконаного проекту керівником	10.06.2025 - 13.06.2025	
9	Захист проекту	13.06.2025 - 23.06.2025	

Здобувач

(підпис)

Кузьменко А.М.

Керівник роботи (проекту)

(підпис)

старший викладач Мірошник А.М.

(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до атестаційної роботи містить 66 сторінок, 25 рисунків, 4 таблиці, 4 додатки, 14 джерел за переліком посилань.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, РАДІОЛОКАЦІЙНА СИСТЕМА, СКАНУВАННЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ARDUINO, GUI, C++, PROCESSING.

Об'єктом розробки є система радіолокаційного сканування, що дозволяє визначати відстані до об'єктів у навколишньому просторі та відобразити результати у графічному вигляді.

Предметом розробки є апаратно-програмний комплекс, призначений для реалізації функцій радіолокаційного сканування.

Метою розробки є створення системи радіолокаційного сканування на базі мікроконтролера, яка забезпечує точне визначення відстаней до об'єктів у різних напрямках, стабільну роботу апаратної частини та інтерактивний графічний інтерфейс для відображення результатів сканування в режимі реального часу.

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено детальний аналіз предметної області, а саме, розглянуто теоретичні засади та існуючі технічні рішення у сфері радіолокаційного сканування простору.

У другому розділі представлено схему апаратної складової системи, а також наведено аргументований вибір технічних компонентів для її реалізації.

У третьому розділі наведено алгоритм та реалізацію програмного забезпечення системи, яке складається з двох частин – програмне забезпечення для плати Arduino, та програмне забезпечення для інтерфейсу системи.

В останньому розділі проведено тестування макетного зразка системи та наведено результати, які показали працездатність проектованої системи.

## ABSTRACT

Bachelor's thesis contains 66 pages, 25 figures, 4 tables, 4 appendices, 14 sources according to the list of references.

AUTOMATED SYSTEM, RADIO LOCATION SYSTEM, SCANNING, MICROCONTROLLER, ARDUINO, GUI, C++, PROCESSING.

The object of the development is a radar scanning system that enables the measurement of distances to objects in the surrounding environment and displays the results in a graphical format.

The subject of the development is a hardware-software complex designed to implement the functions of radar scanning.

The aim of the development is to create a radar scanning system based on a microcontroller, ensuring accurate distance measurement to objects in various directions, stable operation of the hardware, and an interactive graphical interface for real-time visualization of the scanning results.

The first chapter of the qualification work provides a detailed analysis of the subject area, including a review of the theoretical foundations and existing technical solutions in the field of radar scanning.

The second chapter presents the schematic diagram of the system's hardware components, along with a justified selection of technical components for its implementation.

The third chapter describes the algorithm and implementation of the system's software, which consists of two parts: software for the Arduino board and software for the system interface.

The final chapter includes testing of the system prototype and presents the results, which demonstrated the operability of the designed system.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів ..	8
Вступ.....	9
1 Системи радіолокаційного сканування .....	11
1.1 Радіолокаційне сканування .....	11
1.2 Радіолокаційна станція .....	16
1.2.1 Первинні РЛС .....	19
1.2.2 Вторинний радіолокатор .....	24
1.3 Технічне завдання на проектування.....	28
2 Розробка апаратної платформи системи.....	30
2.1 Опис функціональної схеми радіолокатора .....	30
2.2 Опис структурної схеми радіолокатора.....	34
2.3 Апаратна реалізація контролера.....	37
2.4 Апаратна реалізація передавача та приймача .....	39
2.5 Апаратна реалізація підсистеми обробки даних та візуалізації... ..	44
3 Розробка програмного забезпечення.....	46
3.1 Структура програмного забезпечення та вибір технологій.....	46
3.2 Реалізація програмного забезпечення для контролера системи ..	50
3.3 Реалізація програмного забезпечення для комп'ютера .....	52
4 Дослідна експлуатація макетного зразка.....	58
4.1 Опис макетного зразка та методики випробувань.....	58
4.2 Результати моделювання роботи тестового зразка .....	60
Висновки .....	63

Перелік джерел посилання.....	65
Додаток А.....	67
Додаток Б.....	77
Додаток В.....	78
Додаток Г.....	79

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

РЛС – радіолокаційна станція.

УЗД – ультразвуковий датчик.

МК – мікроконтролер.

Arduino – апаратно-програмна платформа для розробки електронних пристроїв.

C++ – мова програмування, яка використовується для написання програмного забезпечення.

IDE – інтегроване середовище розробки (Integrated Development Environment).

Серводвигун – електромеханічний пристрій, який виконує точне позиціонування валу відповідно до керуючого сигналу.

Діаграма сканування – графічне відображення результатів радіолокаційного дослідження у вигляді залежності відстані до об'єктів від кута огляду.

ШИМ – широтно-імпульсна модуляція, метод регулювання потужності електродвигунів.

Processing – програмне середовище для створення графічних інтерфейсів.

Напруга живлення (V) – електрична напруга, необхідна для роботи системи, вимірюється у вольтах.

Частота оновлення даних (Hz) – кількість оновлень результатів сканування за секунду, вимірюється в герцах.

Режим реального часу – виконання операцій одночасно з їх виникненням або з мінімальною затримкою.

## ВСТУП

Сучасні радіолокаційні системи відіграють важливу роль у багатьох галузях, таких як транспорт, безпека, наукові дослідження, автоматизація виробництв та робототехніка. Радіолокація дозволяє виявляти об'єкти на великих відстанях і контролювати їх рух, що робить її незамінною в ситуаціях, де необхідна точність і швидка реакція системи. Тема даної кваліфікаційної роботи — розробка системи радіолокаційного сканування на базі мікроконтролера — є особливо актуальною в умовах стрімкого розвитку технологій та переходу до більш економічних та енергоефективних рішень.

Мікроконтролери відкривають нові можливості для створення компактних і продуктивних радіолокаційних систем. Вони дозволяють інтегрувати як апаратну, так і програмну складову в одне рішення, що значно спрощує розробку і знижує витрати на виробництво. У контексті радіолокаційного сканування мікроконтролери виступають не лише як центральні елементи системи управління, але й як обчислювальні блоки, які забезпечують збір, обробку та аналіз сигналів у реальному часі. Це важливо для розв'язання таких задач, як виявлення об'єктів і вимірювання відстані до них.

Основна мета цієї роботи полягає в розробці повнофункціональної системи радіолокаційного сканування на базі мікроконтролера, здатної до автономної роботи з мінімальним енергоспоживанням і високою точністю. У роботі буде проаналізовано існуючі технічні рішення та обрано оптимальні компоненти для створення апаратної частини системи. Особлива увага буде приділена розробці алгоритмів, що забезпечать точність вимірювань, обробку радіолокаційних сигналів і управління виконавчими елементами.

Дослідження охоплює теоретичні аспекти радіолокації, аналіз існуючих рішень та технологій, а також практичну реалізацію розробленої системи. Особлива увага приділяється оптимізації апаратної та програмної складової,

що забезпечить мінімальне енергоспоживання, точність вимірювань та простоту використання.

Окрім технічної частини, робота також охоплює аспекти інтеграції системи в реальне середовище та її відповідність сучасним екологічним стандартам. У рамках дослідження буде розроблено прототип системи з можливістю подальшої оптимізації для промислового використання або комерційних додатків.

# 1 СИСТЕМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СКАНУВАННЯ

## 1.1 Радіолокаційне сканування

### **Радіолокаційне зондування (також відоме як радарне обстеження)**

— це технологія знаходження, локалізації та моніторингу різноманітних об'єктів шляхом застосування радіочастотних хвиль через спеціалізовані системи — радіолокаційні установки або радари [1].

Існують два основні підходи до радіолокації:

– Активний принцип радіолокації полягає у тому, що радіолокаційна система випромінює власні радіосигнали у напрямку досліджуваного об'єкта, а потім аналізує відбиті від нього хвилі. Порівнюючи характеристики випроміненого та відбитого сигналів, система визначає параметри цілі.

– Пасивний принцип радіолокації базується на реєстрації та аналізі власного електромагнітного випромінювання об'єктів спостереження. Для цього зазвичай використовується кілька радіолокаційних пристроїв, які фіксують радіохвилі або інфрачервоне випромінювання від цілей. Наприклад, це може бути тепловий слід від двигунів повітряних суден, наземної техніки чи енергетичних установок систем зв'язку та радіоелектронної боротьби.

Активна радіолокація поділяється на два різновиди:

– Метод з активним відгуком передбачає встановлення на об'єкті спеціального радіопристрою-транспондера, який генерує радіосигнали у відповідь на отриманий запит. Такий підхід використовується для ідентифікації об'єктів за принципом розпізнавання "свій-чужий", дистанційного управління та передачі додаткових даних, таких як залишок пального або тип транспортного засобу.

– Метод з пасивним відгуком функціонує за рахунок відбиття радіосигналу від поверхні об'єкта без використання активних відповідних пристроїв на самому об'єкті.

Залежно від умов поширення радіохвиль розрізняють радіолокацію прямої видимості, коли між радаром та ціллю немає перешкод, та непрямую радіолокацію, коли сигнал досягає об'єкта через відбиття від різних середовищ. Прикладом непрямої радіолокації є іоносферна локація, де радіолокаційна станція використовує відбиття радіохвиль від іоносферних шарів атмосфери для визначення відстані, швидкості та азимуту цілі за межами прямої видимості.

Процес сканування може виконуватися за допомогою плоского або пучкового променя. Плоским вважається промінь з різко відмінними кутами розсіювання в перпендикулярних площинах, тоді як пучковий промінь характеризується вузькою спрямованістю та симетричністю відносно осі максимальної потужності випромінювання.

Серед найпоширеніших способів сканування плоским променем виділяють кругове обертання променя навколо фіксованої осі та секторне коливання променя в межах певного кутового діапазону. Також застосовуються багатопроменеві системи сканування з використанням плоских променів.

При скануванні голчастим променем складний рух променя можна представити у вигляді двох простих: переносного і відносного, що здійснюються навколо нерухомої осі, що рухається. Основні види сканування голчастим променем - гвинтове (рис. 1.1), зигзагоподібне (рис. 1.2), спіральне (рис. 1.3) і поступально-конічне (рис. 1.4), поширений окремий випадок якого – конічне сканування (рис. 1.5).

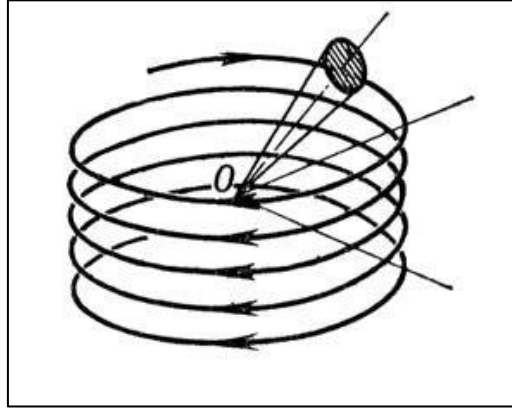


Рисунок 1.1 – Переміщення променя при гвинтовому скануванні

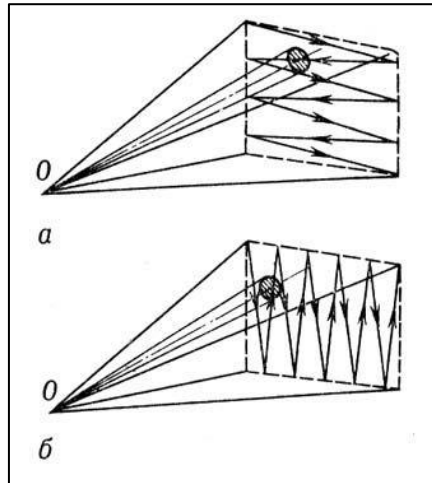


Рисунок 1.2 – Переміщення променя при зигзагоподібному скануванні

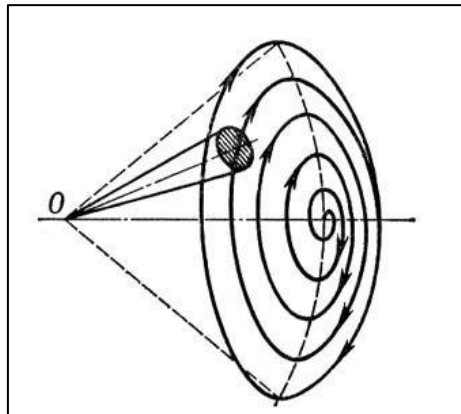


Рисунок 1.3 – Переміщення променя при спіральному скануванні

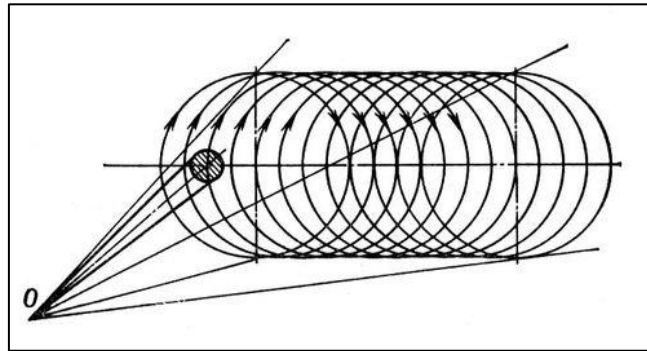


Рисунок 1.4 – Переміщення променя при поступально-конічному скануванні

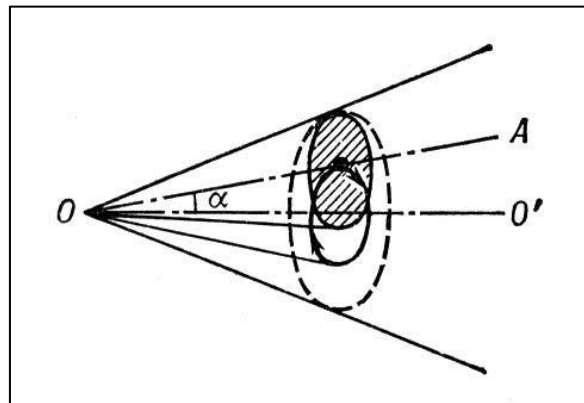


Рисунок 1.5 – Переміщення променя при конічному скануванні

Радіолокаційні системи мають численні позитивні характеристики, що робить їх незамінними в багатьох галузях діяльності. Найважливішою перевагою є здатність функціонувати в несприятливих погодних умовах та при відсутності видимості. Коли туман огортає місцевість, дощ заливає територію, сніг застилає простір або настає темрява ночі, радари продовжують працювати з високою ефективністю, не втрачаючи своїх детекційних властивостей.

Дальність виявлення об'єктів становить ще одну критично важливу перевагу цих систем. Радіолокатори здатні реєструвати присутність цілей на величезних відстанях, що робить їх ключовими інструментами в авіаційній навігації, метеорологічних спостереженнях та оборонних комплексах. Крім

простого виявлення, ці системи забезпечують комплексний аналіз параметрів руху об'єктів, точно вимірюючи не лише відстань до цілі, а й швидкість її переміщення та векторний напрямок руху.

Автономність роботи радіолокаційних систем полягає в їх незалежності від зовнішніх джерел освітлення. На відміну від оптичних систем спостереження, радары генерують власне електромагнітне випромінювання, що дозволяє їм працювати цілодобово незалежно від наявності сонячного світла чи штучного освітлення. Сучасні багатопроменеві радіолокатори та системи з фазованими антенними решітками демонструють додаткову перевагу одночасного відстеження множини об'єктів.

Незважаючи на значні переваги, радіолокаційні системи мають суттєві недоліки, які необхідно враховувати при їх впровадженні. Складність конструкції цих систем призводить до високих витрат на виробництво, встановлення та подальше технічне обслуговування. Це робить радіолокаційні комплекси значною фінансовою інвестицією для організацій та держав.

Радіохвилі схильні до різноманітних видів спотворень та послаблень під впливом природних явищ та штучних перешкод. Електромагнітні завади від інших радіосигналів можуть значно знизити якість прийому, а спеціалізовані засоби радіоелектронної боротьби здатні повністю заблокувати роботу радарів. Атмосферні умови, рельєф місцевості та урбанізовані території також можуть створювати значні перешкоди для поширення радіохвиль.

Проблема хибних спрацьовувань становить серйозний виклик для операторів радіолокаційних систем. Природні об'єкти на кшталт густих хмар, зграй птахів або метеорологічних явищ можуть генерувати сигнали, схожі на ті, що створюють справжні цілі. Це може призводити до помилкових тривог та ускладнювати процес ідентифікації реальних загроз.

Роздільна здатність радарів має фізичні обмеження, особливо при роботі на великих відстанях. Виявлення малорозмірних об'єктів або розрізнення близько розташованих цілей стає проблематичним, коли вони знаходяться на межі досяжності системи. Ефективність радіолокації також значною мірою

залежить від фізичних характеристик досліджуваних об'єктів. Розмір, геометрична форма та матеріали, з яких виготовлено об'єкт, кардинально впливають на інтенсивність відбитого сигналу. Деякі сучасні матеріали та спеціальні покриття можуть практично повністю поглинати радіохвилі, роблячи об'єкти майже невидимими для радіолокаційних систем.

Аналізуючи співвідношення переваг та недоліків радіолокаційних технологій, можна виокремити ключові галузі, де ці системи знайшли найширше застосування. Авіаційна та морська навігація використовують радари як основний інструмент безпеки руху, забезпечуючи контроль повітряного простору та морських акваторій. Системи протиповітряної оборони покладаються на радіолокаційні комплекси для раннього виявлення та супроводження потенційних загроз.

Метеорологічні служби застосовують спеціалізовані погодні радари для моніторингу атмосферних процесів, прогнозування штормів та відстеження руху опадів. Картографічні роботи та геодезичні дослідження активно використовують радіолокаційне зондування для створення точних топографічних карт та вивчення земної поверхні. Космічні дослідження та астрономія також покладаються на радіолокаційні технології для вивчення віддалених об'єктів та планетарних поверхонь.

## 1.2 Радіолокаційна станція

Радіолокаційна установка, відома також як радар (що походить від англійського терміна "radio detection and ranging", тобто радіовиявлення та дальнометрія), являє собою складну радіотехнічну систему, призначену для детекції повітряних, морських та наземних об'єктів з одночасним визначенням їх просторових координат, параметрів руху та фізичних характеристик. Ця технологія базується на фундаментальних принципах радіолокації, які полягають у генерації електромагнітних хвиль радіочастотного діапазону та подальшому аналізі їх відгуків від досліджуваних об'єктів [2].

Приклад зовнішнього вигляду радіолокаційної станції наведено на рисунку 1.6.



Рисунок 1.6 – Радіолокаційна станція

Щоб зрозуміти роботу радіолокаційних систем, варто розглянути послідовність операцій, які відбуваються під час кожного циклу сканування. Цей процес можна порівняти з принципом ехолокації, який використовують кажани або дельфіни, але замість звукових хвиль радари працюють з електромагнітним випромінюванням.

Перший етап роботи радіолокаційної системи полягає у генерації та випромінюванні радіосигналу. Радіопередавач створює потужний електромагнітний імпульс, який через антенну систему направляється у простір. Ця радіохвиля поширюється зі швидкістю світла, проникаючи через атмосферу у пошуках потенційних об'єктів. Важливо розуміти, що енергія

сигналу розподіляється в просторі, тому інтенсивність випромінювання зменшується з квадратом відстані від джерела.

Коли радіохвиля досягає об'єкта, відбувається складний фізичний процес взаємодії електромагнітного поля з матеріалом цілі. Частина енергії поглинається об'єктом, частина може проходити наскрізь, а певна частка відбивається назад у напрямку радіолокаційної станції. Інтенсивність та характеристики відбитого сигналу залежать від численних факторів, включаючи розміри об'єкта, його форму, матеріал поверхні, орієнтацію відносно падаючої хвилі та навіть текстуру поверхні.

Третій етап включає реєстрацію відбитого сигналу радіоприймачем системи. Цей слабкий відгук, що повернувся від об'єкта, містить безцінну інформацію про характеристики цілі. Радіоприймач повинен бути надзвичайно чутливим, оскільки відбитий сигнал зазвичай у мільйони разів слабший за первинно випромінений. Система також повинна точно вимірювати моменти часу випромінювання та прийому сигналу.

Заключний етап полягає в обробці та інтерпретації отриманих даних. Обчислювальні системи аналізують часову затримку між випромінюванням та прийомом сигналу, що дозволяє точно визначити відстань до об'єкта за простою формулою: відстань дорівнює половині добутку швидкості світла на час затримки. Аналіз зміни частоти відбитого сигналу через ефект Доплера дає інформацію про швидкість руху об'єкта, а характеристики амплітуди та фази сигналу можуть розкрити деталі про розміри та форму цілі.

Результати всіх цих обчислень перетворюються на зручний для сприйняття формат та відображаються на моніторі оператора. Сучасні радіолокаційні системи можуть представляти інформацію у вигляді двовимірних або тривимірних зображень, числових таблиць, графіків або навіть звукових сигналів. Це дозволяє операторам ефективно контролювати навколишній простір та виявляти об'єкти, які неможливо побачити неозброєним оком через погодні умови, темряву або великі відстані.

### 1.2.1 Первинні РЛС

Первинний (з пасивним відповіддю) радіолокатор, переважно, служить виявлення цілей, опромінюючи їх електромагнітної хвилею і потім приймаючи відбиття (луна) від мети. Оскільки швидкість електромагнітних хвиль стала (швидкість світла), стає можливим визначити відстань до мети, ґрунтуючись на вимірі різних параметрів при поширенні сигналу [2].

Кожна радіолокаційна система з пасивним відгуком, яка становить основу більшості сучасних радарів, побудована на трьох фундаментальних компонентах, що працюють у тісній взаємодії. Ці компоненти можна порівняти з органами людського тіла - кожен виконує свою унікальну функцію, але лише їх злагоджена робота забезпечує ефективність всієї системи.

Передавальний пристрій виступає серцем радіолокаційної системи, генеруючи потужні електромагнітні сигнали, які забезпечують виявлення цілей. Для імпульсних радіолокаторів сантиметрового діапазону найчастіше використовуються магнетрони або складні генераторні схеми, що включають генератор опорної частоти та потужний підсилювач на основі лампи біжучої хвилі. Магнетрон являє собою спеціальну електронну лампу, здатну генерувати надзвичайно потужні короткочасні імпульси електромагнітного випромінювання. Для радіолокаторів метрового діапазону частіше застосовуються тріодні лампи, які забезпечують стабільну роботу на нижчих частотах.

Варто розуміти важливу різницю між когерентними та некогерентними системами. Радіолокатори на основі магнетронів зазвичай є некогерентними або псевдокогерентними, що означає відсутність сталого фазового зв'язку між послідовними імпульсами. Натомість системи на основі ламп біжучої хвилі забезпечують когерентність сигналу, що дозволяє застосовувати більш складні методи обробки інформації та підвищувати точність вимірювань.

Залежно від обраного методу вимірювання відстані, передавач може працювати в імпульсному режимі, генеруючи короткі потужні електромагнітні спалахи з регулярними інтервалами, або в режимі безперервного випромінювання зі спеціальною модуляцією сигналу.

Антенна система виконує подвійну функцію, слугуючи одночасно "ротом" і "вухами" радіолокаційної станції. Вона забезпечує спрямоване випромінювання сигналу передавача у потрібному напрямку та ефективний прийом слабких відбитих сигналів від цілей. У більшості випадків передача та прийом здійснюються через одну антену, що працює у почерговому режимі. Під час випромінювання антена направляє потужний сигнал у простір, а в наступний момент переключається на режим прийому для реєстрації відгуків.

Оскільки потужність випроміненого сигналу в тисячі разів перевищує силу відбитого сигналу, між передавачем та приймачем встановлюється спеціальний захисний пристрій. Цей елемент автоматично блокує вхід приймача під час випромінювання, запобігаючи пошкодженню чутливих компонентів приймального тракту. У деяких спеціалізованих системах використовуються окремі передавальні та приймальні антени, які можуть розташовуватися на значній відстані одна від одної.

Приймальний пристрій представляє найбільш складну та чутливу частину радіолокаційної системи. Його завдання полягає в посиленні надзвичайно слабких відбитих сигналів та їх подальшій обробці для отримання корисної інформації про виявлені об'єкти. У найпростіших системах оброблений сигнал подається безпосередньо на екран електронно-променевої трубки, створюючи зображення, синхронізоване з рухом антени. Сучасні радіолокатори використовують складні цифрові процесори, які здатні виконувати комплексний аналіз прийнятих сигналів та представляти результати у найзручнішому для оператора вигляді.

Різноманітність радіолокаційних систем значною мірою визначається методами, які вони використовують для аналізу відбитих сигналів. Кожен

метод має свої унікальні переваги та обмеження, що робить їх більш або менш придатними для конкретних застосувань.

### **Частотний метод.**

Частотний метод базується на принципі частотної модуляції безперервного сигналу, що дозволяє визначати відстань до цілі через аналіз різниці частот випроміненого та прийнятого сигналів. У класичній реалізації цього методу частота сигналу змінюється за лінійним законом протягом певного періоду часу. Через затримку поширення радіохвиль різниця між частотою випроміненого та прийнятого сигналів прямо пропорційна часу поширення, що дозволяє обчислити відстань до об'єкта.

Головною перевагою частотного методу є можливість вимірювання дуже малих відстаней та використання відносно малопотужних передавачів. Однак цей метод вимагає застосування двох окремих антен та характеризується високими вимогами до лінійності зміни частоти. Крім того, чутливість приймача може погіршуватися через проникнення сигналу передавача в приймальний тракт.

### **Фазовий метод.**

Фазовий або когерентний метод ґрунтується на аналізі різниці фаз між випроміненим та відбитим сигналами, що виникає через ефект Доплера при відбитті від рухомих об'єктів. Цей метод особливо ефективний для виявлення об'єктів, що рухаються, оскільки дозволяє відфільтрувати перешкоди від нерухомих предметів. Передавач може працювати як у безперервному, так і в імпульсному режимі.

Однозначний діапазон виміру дальності при одночастотному зондуванні визначається виразом:

$$D_{max} = \frac{c}{2f}, \quad (1.1)$$

де  $c$  – швидкість світла;

$f$  – частота випромінювання.

Щоб розширити діапазон однозначного виміру дальності, практично використовують складніші схеми, у яких присутні дві і більше частот. У цьому випадку однозначна дальність визначається максимальним частотним рознесенням  $\delta f$  випромінюваних сигналів:

$$D_{max} = \frac{c}{2\delta f}. \quad (1.2)$$

Основними перевагами фазового методу є низьке енергоспоживання завдяки генерації незатухаючих коливань, висока точність вимірювань, що залежить від доплерівського зсуву частоти, та відносна простота конструкції. Недоліками є відсутність роздільної здатності по дальності при використанні одночастотних сигналів та можливе погіршення чутливості через проникнення сигналу передавача в приймач.

### **Імпульсний метод.**

Імпульсний метод став основою для більшості сучасних радіолокаційних систем завдяки своїй універсальності та ефективності. Принцип роботи нагадує визначення відстані за допомогою ехо - радар випромінює короткий потужний імпульс, після чого переходить у режим очікування відгуку. Оскільки швидкість поширення електромагнітних хвиль є сталою величиною, час між випромінюванням імпульсу та прийомом відгуку прямо пропорційний відстані до об'єкта.

Важливим параметром імпульсних систем є період повторення імпульсів, який визначає максимальну дальність виявлення та кількість цілей, що можуть відстежуватися одночасно. Частота повторення імпульсів становить характерну ознаку конкретної моделі радіолокатора та може використовуватися для його дистанційної ідентифікації.

Переваги імпульсного методу включають можливість використання однієї антени для передачі та прийому, простоту індикаторних пристроїв та зручність одночасного вимірювання відстаней до кількох цілей. Недоліками є необхідність використання потужних передавачів та наявність "мертвої зони" поблизу радіолокатора, де виявлення цілей неможливе.

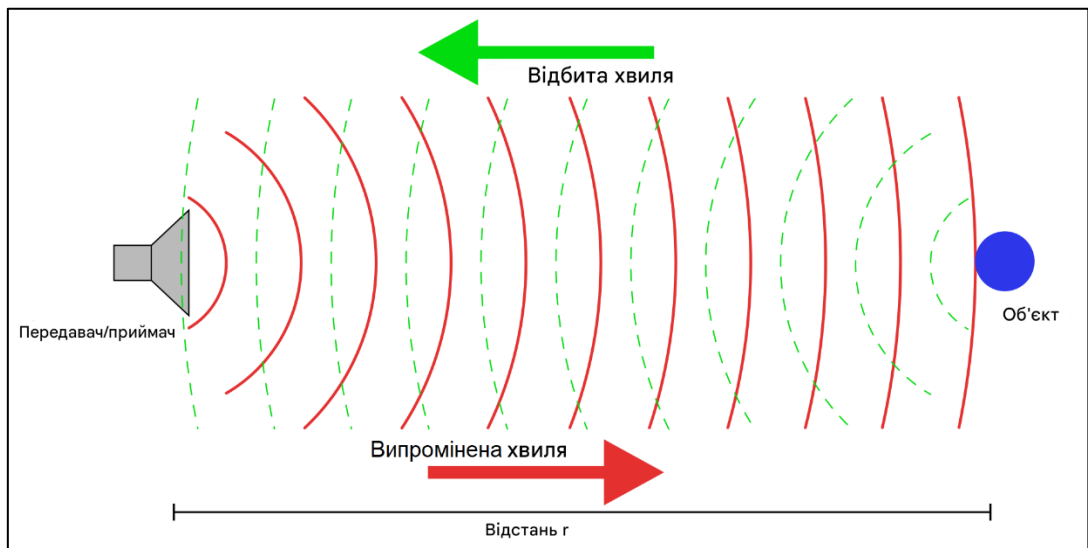


Рисунок 1.7 – Принцип визначення відстані до цілі імпульсним методом

Однією з найскладніших проблем радіолокації є придушення сигналів від нерухомих об'єктів, таких як земна поверхня, будівлі або природні утворення. Ці відбиття можуть маскувати сигнали від справжніх цілей, особливо для наземних радарів при роботі з низько літаючими об'єктами або для бортових систем, де відбиття від земної поверхні може затінювати всі об'єкти нижче літака.

Для вирішення цієї проблеми використовується ефект Доплера, який дозволяє розрізняти рухомі та нерухомі об'єкти за зміною частоти відбитого сигналу. Найпростішим рішенням є система селекції рухомих цілей, яка порівнює відбиття від кількох послідовних інтервалів повторення імпульсів.

Більш складні імпульсно-доплерівські радіолокатори використовують банки доплерівських фільтрів, кожен з яких налаштований на певну частоту. Така система дозволяє виявляти цілі з заданими швидкостями руху та може бути реалізована як апаратно, так і програмно. Для визначення відстаней у таких системах інтервал повторення імпульсів розділяється на відрізки

дальності, а обчислення здійснюється за результатами багаторазових повторень на різних частотах.

Найефективнішим методом боротьби з активними радіоелектронними перешкодами є використання цифрових антенних решіток, які дозволяють формувати провали в діаграмі спрямованості точно у напрямках джерел перешкод, зберігаючи при цьому чутливість в інших напрямках.

### 1.2.2 Вторинний радіолокатор

На відміну від первинних систем, які покладаються на пасивне відбиття радіохвиль від цілей, вторинна радіолокація базується на принципі активної кооперації між наземною станцією та об'єктом спостереження.

Ключовою особливістю вторинних радіолокаційних систем є використання спеціальних активних відповідачів, встановлених на контрольованих об'єктах. Ці пристрої не просто відбивають падаючі радіохвилі, а активно генерують власні сигнали у відповідь на запити від наземних станцій. Така архітектура дозволяє не лише визначати положення об'єкта, але й отримувати від нього додаткову інформацію, таку як ідентифікаційний номер, висота польоту, швидкість або інші важливі параметри. Приклад вторинної РЛС наведено на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Вторинна РЛС

Архітектура вторинної радіолокаційної системи значно складніша за будову первинних радарів та включає сім основних компонентів, кожен з яких виконує специфічну функцію в загальному процесі виявлення та ідентифікації цілей.

Передавач наземної станції спеціально сконструйований для генерації стандартизованих запитних імпульсів на частоті 1030 МГц. Ця частота була обрана міжнародними стандартами авіації для забезпечення глобальної сумісності всіх вторинних радіолокаційних систем. Передавач формує не один, а три різні імпульси з точно визначеними часовими інтервалами, що дозволяє літаковим відповідачам розрізнити справжні запити від можливих перешкод.

Антенна система вторинного радара виконує подвійну функцію на двох різних частотах відповідно до міжнародних стандартів ІСАО. Вона випромінює запитні сигнали на частоті 1030 МГц та одночасно приймає відповіді від літакових відповідачів на частоті 1090 МГц. Такий розподіл частот дозволяє уникнути взаємного впливу між запитними та відповідними сигналами, забезпечуючи чисту та надійну передачу даних.

Генератори азимутальних міток представляють унікальний компонент, який відсутній у первинних радіолокаційних системах. Ці пристрої синхронізовані з обертанням антени та генерують два типи міток для точного визначення кутового положення виявлених об'єктів. Протягом одного повного оберту антени генерується велика кількість азимутальних міток - 4096 для старих систем або 16384 для сучасних удосконалених систем. Ці мітки служать своєрідною кутовою шкалою для визначення точного азимута виявлених цілей.

Окрім численних азимутальних міток, система генерує одну спеціальну мітку Півночі, яка подається точно в той момент, коли антена направлена на географічну північ. Ця опорна мітка служить початковою точкою відліку для всіх азимутальних вимірювань, забезпечуючи прив'язку кутових координат до справжнього географічного напрямку.

Приймач вторинної радіолокаційної станції налаштований виключно на частоту 1090 МГц для прийому відповідей від літакових відповідачів. Цей пристрій повинен бути надзвичайно чутливим, оскільки потужність сигналів від літакових відповідачів значно менша за потужність запитних імпульсів наземної станції.

Сигнальний процесор являє собою складний цифровий пристрій, який аналізує прийняті сигнали, декодує інформацію, закодовану в імпульсах відповіді, та формує остаточні дані про виявлені повітряні судна. Цей компонент виконує критично важливу функцію перетворення сирових радіосигналів у зрозумілу для операторів інформацію.

Індикаторна система забезпечує візуальне представлення обробленої інформації для операторів диспетчерських служб. Сучасні індикатори можуть відображати не лише позиції літаків, але й супроводжувати кожну ціль текстовою інформацією про номер рейсу, висоту, швидкість та інші параметри.

Літаковий відповідач з антеною представляє бортовий компонент системи, встановлений на кожному повітряному судні. Цей пристрій постійно моніторить радіочастотний спектр на частоті 1030 МГц, очікуючи запитів від наземних радіолокаційних станцій.

Процес взаємодії між наземною станцією та літаковим відповідачем нагадує складний діалог, заснований на точно визначених правилах та протоколах. Наземна станція випромінює три імпульси з позначеннями P1, P2 та P3, де P2 є імпульсом придушення, призначеним для запобігання хибним спрацьовуванням від бічних пелюсток антени.

Літаковий відповідач аналізує отримані сигнали та відповідає лише в тому випадку, якщо потужність імпульсів P1 та P3 перевищує потужність імпульсу придушення P2. Ця умова гарантує, що відповідь надсилається лише тоді, коли літак знаходиться в основному промені антени наземної станції, а не в зоні дії слабких бічних пелюсток.

Режим роботи системи визначається часовим інтервалом між запитними імпульсами P1 та P3. Коли цей інтервал становить 8 мікросекунд, система працює в режимі А, і літаковий відповідач кодує у своїй відповіді ідентифікаційний номер борту. При інтервалі 21 мікросекунда активується режим С, в якому відповідач передає інформацію про поточну висоту польоту.

Гнучкість системи дозволяє наземним станціям чергувати різні режими запитів, наприклад, послідовно використовувати режими А та С для отримання як ідентифікаційної інформації, так і даних про висоту від кожного виявленого повітряного судна.

Визначення координат цілі здійснюється комбінованим методом. Азимут повітряного судна обчислюється на основі кута повороту антени в момент прийому відповіді, який, у свою чергу, визначається шляхом підрахунку азимутальних міток від останньої мітки Півночі. Відстань до літака розраховується за часовою затримкою між надсиланням запиту та отриманням відповіді, використовуючи знання про швидкість поширення радіохвиль.

Переваги вторинної радіолокації над первинними системами є досить значними та багатогранними. Точність визначення координат зазвичай вища, оскільки сигнали від активних відповідачів мають кращі характеристики, ніж слабкі відбиття від пасивних об'єктів. Можливість отримання додаткової інформації про повітряні судна, такої як номер борту та висота польоту, робить ці системи незамінними для управління повітряним рухом.

Енергетичні переваги також суттєві - оскільки літаковий відповідач генерує власний сигнал замість простого відбиття падаючої хвилі, наземна станція може працювати з меншою потужністю випромінювання при збереженні великої дальності виявлення. Це не лише знижує енергоспоживання, але й зменшує електромагнітне забруднення навколишнього середовища.

### 1.3 Технічне завдання на проектування

Метою кваліфікаційної роботи є проектування і розробка програмно-технічного комплексу системи радіолокаційного сканування на базі мікроконтролера.

Апаратна складова проектованої системи складається з наступних компонентів: передавач/приймач, контролер, підсистема обробки даних, підсистема візуалізації результатів сканування у зрозумілому для користувача вигляді.

Алгоритм роботи проектованої системи наступний:

1. Після запуску система перевіряє підключення плати до комп'ютеру через послідовний порт.
2. У разі, якщо система знайшла необхідний послідовний порт, програмний інтерфейс комп'ютера з'єднується з платою.
3. Одразу ж після успішного з'єднання плати з комп'ютером активуються усі компоненти.
4. Антена у режимі «передавач» спочатку посилає короткочасний імпульс, після чого чекає на ехо-сигнал.
5. Коли імпульс відбивається від об'єкта радіолокації, він повертається до антени, яка у цей момент працює в режимі «приймач» і фіксує ехо-сигнал.
6. Далі прийнятий антеною сигнал відцифровується та передається до контролеру на попередню обробку. Антена у цей момент перемикається у режим «передавач» та посилає наступний імпульс
7. Паралельно з антеною працює також конструкція повороту, яка повертає антену для розширення поля зору і збільшення площі сканування.
8. Ехо-сигнал передається з контролера до підсистеми обробки даних, де за наявним алгоритмом сигнал перетворюється на відстань.
9. Отримане значення відстані візуалізується у зрозумілому для користувача вигляді і виводиться на спеціальному екрані підсистеми індикації.

10. Весь алгоритм повторюється циклічно з невеликими інтервалами часу, що дозволяє провести повноцінне сканування та зреагувати на різні предмети у полі зору системи.

11. У разі виникнення помилок на будь-якому з попередніх етапів, система генерує та виводить у інтерфейс спеціальні повідомлення.

Система має бути простою та зрозумілою у використанні; мати прийнятний рівень безпеки та не бути занадто дорогою в реалізації.

## 2 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ПЛАТФОРМИ СИСТЕМИ

У першому розділі кваліфікаційної роботи було детально розглянуто предметну область, а саме теоретичні засади радіолокаційного сканування та існуючі технології у цій сфері.

У цьому розділі буде детально описано процес створення апаратної платформи проектованої системи та вибір необхідних для цього компонентів.

### 2.1 Опис функціональної схеми радіолокатора

Функціональна схема імпульсного радіолокатора наведена на рисунку 2.1 [3].

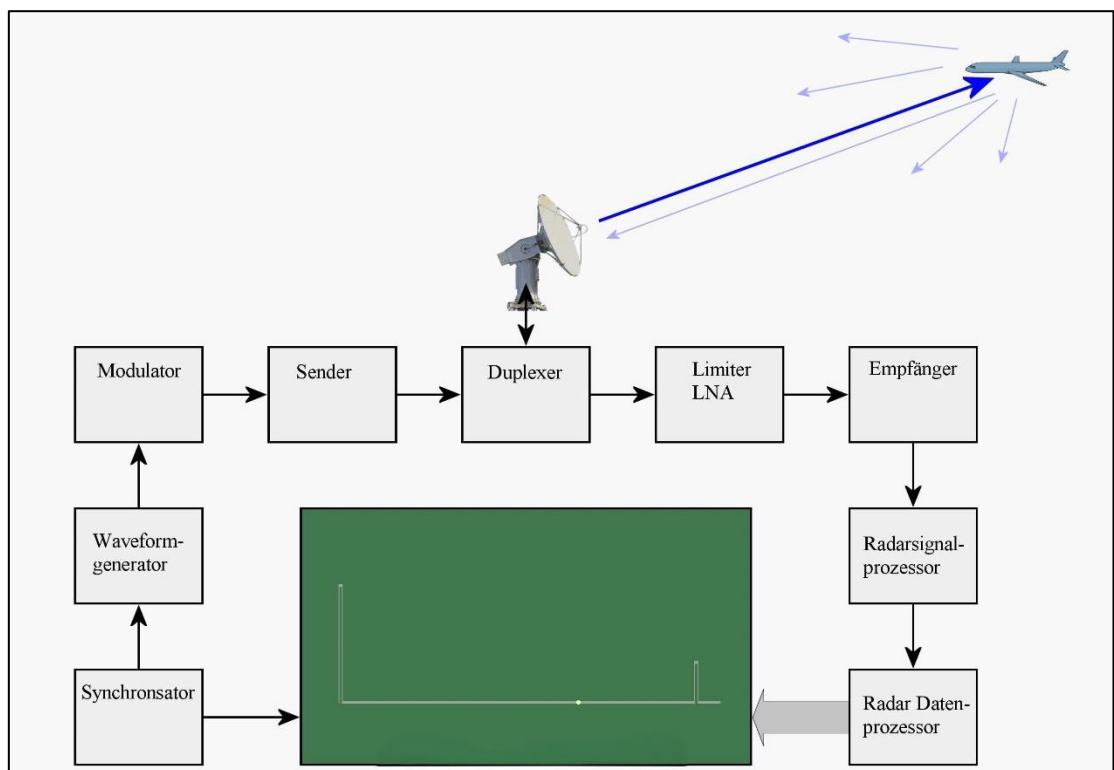


Рисунок 2.1 – Функціональна схема імпульсного радіолокатора

### 1. Система синхронізації

Пристрій синхронізації функціонує як головний координатор часових інтервалів у радіолокаційній станції. Він забезпечує генерацію всіх необхідних часових міток, сигналів узгодження та стробуючих імпульсів. Найважливішою функцією цього елемента є створення пускового сигналу для передавального пристрою, що встановлює точний момент початку випромінювання розвідувального радіохвильового сигналу.

### 2. Формувач зондувальних сигналів

В сучасних радіолокаційних системах цей блок відповідає за створення складних розвідувальних сигналів з певною структурою на проміжній робочій частоті. Основне завдання формувача полягає у визначенні часових характеристик зондувальних імпульсів. У попередніх поколіннях радіолокаторів цей функціональний блок був інтегрований до складу модуляційного пристрою та реалізовувався у формі спеціалізованого формувального кола.

### 3. Модуляційний пристрій

У переважній більшості сучасних радіолокаційних станцій модулятор здійснює перенесення зондувального сигналу на робочу частоту передавального тракту. У радіолокаторах попередніх поколінь функції модулятора обмежувалися лише генерацією високовольтного імпульсу з певною тривалістю, який подавався на анодний електрод генераторної лампи передавального пристрою.

### 4. Передавальний тракт

Передавальний блок забезпечує генерацію зондувального імпульсу з необхідним енергетичним рівнем. Складні сигнальні форми в цьому пристрої підсилюються до потрібного рівня потужності за допомогою спеціальних підсилювальних каскадів. Прості сигнали без внутрішньо-імпульсної модуляції створювалися з використанням потужних самозбуджуваних генераторних ламп, зокрема магнетронних генераторів.

## 5. Антенний комутатор

Антенний комутаційний пристрій виконує роль перемикача між режимами "передача-прийом". Його основне призначення полягає у підключенні антенної системи до передавача протягом часу випромінювання зондувального імпульсу, одночасно забезпечуючи захист приймального тракту від потрапляння потужних сигналів, які можуть призвести до пошкодження приймача. У режимі прийому цей пристрій передає отриманий відбитий сигнал до приймального тракту з мінімальними енергетичними втратами.

## 6. Система часового автоматичного керування підсиленням (ЧАКП)

Цей компонент являє собою підсилювальний каскад зі змінним коефіцієнтом підсилення, який залежить від часових параметрів. При виявленні об'єкта в ближній зоні відбитий сигнал має достатню потужність і не потребує значного підсилення. При великих відстанях до цілі ехо-сигнали характеризуються надзвичайно низькою інтенсивністю, тому підсилення повинно бути максимальним. Для запобігання перевантаження та насичення приймального тракту це регулювання необхідно здійснювати якнайраніше, тобто ще на несучій частоті. У більшості конструкцій цей елемент додатково оснащується обмежувачем для захисту чутливих каскадів попереднього підсилювача з низьким рівнем власних шумів.

## 7. Приймальний тракт

У приймальному пристрої високочастотний ехо-сигнал перетворюється на сигнал нижчої проміжної частоти, що полегшує його подальшу обробку. Саме на проміжній частоті здійснюється основна частина підсилення прийнятого сигналу. Для досягнення оптимального динамічного діапазону приймального пристрою найчастіше використовуються логарифмічні підсилювальні схеми.

## 8. Процесор сигнальної обробки

У блоці сигнального процесора виконується обробка сигналу (первинна обробка радіолокаційної інформації) в режимі реального часу. На цьому етапі

сигнали піддаються цифровому перетворенню, проте зберігають жорсткий часовий зв'язок із зондувальним імпульсом. На даній стадії може одночасно застосовуватися множина різноманітних фільтрів, після чого для подальшої обробки відбирається лише сигнал з найкращим співвідношенням сигнал-шум. При наступній обробці необхідно враховувати, через який саме фільтр пройшов сигнал, оскільки це становить важливу інформацію для розпізнавання типу цілі.

#### 9. Процесор обробки інформації

У цьому елементі радіолокаційної системи обробляються не безпосередньо сигнали, а їх цифрове представлення. Цифрові дані, що обробляються на цьому етапі, вже не мають прямого зв'язку з пусковим імпульсом передавача, а отже відображаються не в режимі реального часу. Для забезпечення точності відображення радіолокаційної інформації кожен масив даних супроводжується відповідною часовою міткою.

#### 10. Відображувальний пристрій радіолокатора

Враховуючи, що радіолокаційна станція може оснащуватися індикаторними пристроями різних типів, на схемі як приклад представлений аналоговий індикатор (А-індикатор) на базі звичайного осцилографічного пристрою. Його горизонтальна розгортка (вісь абсцис) калібрується відповідно до швидкості розповсюдження електромагнітних коливань у просторі. Отриманий сигнал проходить через каскади приймального пристрою протягом певного часу. Таким чином компенсуються часові затримки у внутрішніх колах осцилографа: час запізнення прийнятого сигналу ( $t$ , відповідно, відстань до об'єкта) вимірюється від переднього фронту випромінюваного імпульсу до переднього фронту ехо-сигналу, що відображається на екрані.

## 2.2 Опис структурної схеми радіолокатора

Загальна функціональна схема, яку представлено на рисунку 2.1, є дуже складною у реалізації, саме тому доцільним є використання мікропроцесорної техніки, що дозволить замінити деякі частини функціональної схеми на комбіновані рішення.

Використання мікропроцесорної техніки в системі радіолокатора забезпечує формування інформаційних та керуючих сигналів у результаті виконання введеної в систему програми. Це зменшує кількість використовуваних елементів та спрощує електричну схему (щоправда, за рахунок використання складніших рішень), а головне, збільшує функціональні можливості системи радіолокації та робить її більш універсальною. Структурну схему імпульсного радіолокатора на базі мікроконтролера представлено на рисунку 2.2.

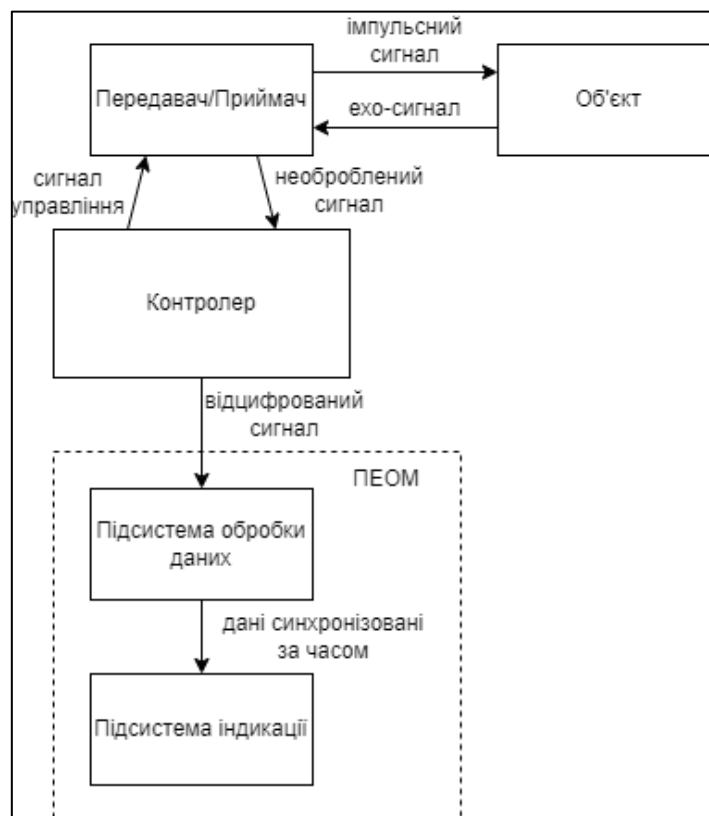


Рисунок 2.2 – Структурна схема імпульсного радіолокатора

Основним компонентом схеми (рис. 2.2) є контролер, який виступає комбінованим пристроєм і виконує функції синхронізатору, генератору сигналів, модулятора та сигнального процесору, які було детально описано у попередньому підрозділі.

Враховуючи розвиток сучасних технологій у сфері мікро- та наноелектроніки, у якості контролера доцільним буде використання мікроконтролерів, адже їх обчислювальна потужність та невеликий розмір дозволяють інтегрувати їх, майже, у будь-яку систему.

Мікроконтролер (МК) – це інтегрована схема, яка виконує функцію управління різними електронними системами та пристроями. Приклади мікроконтролерів представлені на рисунку 2.3. [4]

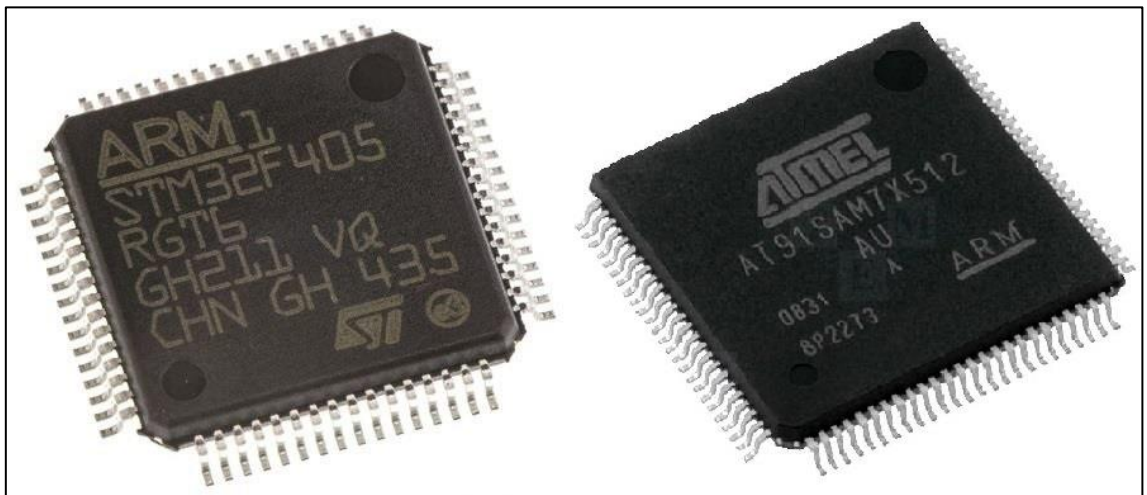


Рисунок 2.3 – Мікроконтролери

Окрім контролера у системі є «передавач/приймач» – це комбінований пристрій, який виконує функції, і передавача імпульсного сигналу, і приймача ехо-сигналу, який повернеться від об'єкта.

Зазвичай, для радіолокації використовують радіосигнал, але альтернативним варіантом може бути використання звукових хвиль, адже вони також розповсюджуються навкруги та з постійною швидкістю (~330 м/с), але на відміну від радіохвиль, менш чутливі до випадкових сигналів та шумів.

Таким чином, доцільно буде у якості елемента «передавач/приймач» використовувати генератор ультразвукових хвиль і елемент чутливий до цих хвиль.

Підсистема обробки даних та підсистема індикації – це дві частини одного елемента. Дуже зручно зробити саме таку реалізацію через те, що отриманий ехо-сигнал у відцифрованому вигляді передається на вхід підсистеми обробки даних, де він синхронізується за часом з імпульсним сигналом та передається одразу до підсистеми індикації для відображення результату.

Для реалізації даної частини структурної схеми доцільно буде використовувати персональну електронно-обчислювальну машину (ПЕОМ) або комп'ютер, адже у нього є достатня обчислювальна потужність для обробки даних, та можливість відображення результатів майже у будь-якому вигляді. Сучасні комп'ютери мають доволі компактний форм-фактор, що дозволить зробити систему менш громіздкою. Приклад компактного комп'ютера наведено на рисунку.



Рисунок 2.4 – Найменший комерційний ноутбук GPD Pocket 3

### 2.3 Апаратна реалізація контролера

Контролер є найважливішою частиною системи, адже виконує одразу декілька ключових функцій, а саме:

- виробляючи імпульс запуску передавача, визначає початковий момент випромінювання зондувального сигналу;
- формує складні зондувальні сигнали структурою на проміжній частоті. У ньому також відбувається формування зондувальних сигналів за тривалістю;
- виконує перенесення зондувального сигналу на частоту передавача, що несе;
- відцифровує ехо-сигнал, пропускаючи його через різні фільтри, щоб отримати вихідний сигнал з найбільшим співвідношенням «корисний сигнал/шум»;
- передає відцифрований ехо-сигнал на подальшу обробку.

Враховуючи усе перелічене раніше, необхідно у якості контролера обрати компонент, який буде підходити за наступними характеристиками:

- мати достатню обчислювальну потужність для роботи програмного забезпечення;
- мати достатній обсяг оперативної пам'яті (ОЗП) для роботи програмного забезпечення;
- мати усі необхідні інтерфейси: UART (послідовний порт), SPI (послідовний периферійний інтерфейс, шина SPI), I<sup>2</sup>C (послідовна асиметрична шина зв'язку між інтегральними схемами всередині електронних приладів), інші інтерфейси - опціонально;

З урахуванням усіх вимог, які висуваються до подібних систем, у якості контролера системи радіолокації можна використовувати мікроконтролер.

Як зазначалося раніше, застосування мікропроцесорних технологій суттєво спрощує структуру системи, оскільки один мікропроцесор може

замінити кілька аналогових елементів. Саме тому було вирішено використовувати мікропроцесорні рішення для реалізації контролеру у проєктованій системі.

Сучасні мікропроцесори мають різні варіанти, що відрізняються не лише зовнішнім виглядом, але й технічними характеристиками, функціональними можливостями та умовами експлуатації. При виборі варто звертати увагу на такі параметри, як обчислювальна потужність, об'єм оперативної та постійної пам'яті, наявність графічного ядра, підтримку інтерфейсів, а також розмір і експлуатаційні властивості.

Одним з найрозповсюдженіших вибором на основі мікропроцесора є комплексне технічне рішення на базі мікроконтролеру AVR ATmega328P (додаток Б) - плата Arduino Nano [5]. Зовнішній вигляд плати представлено на рисунку 2.5, а технічні характеристики – у таблиці 2.1.

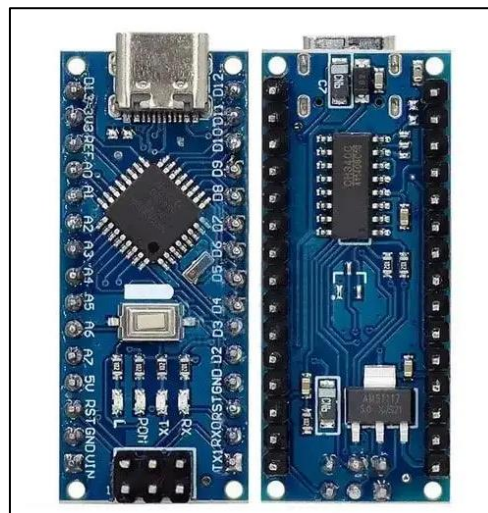


Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд плати Arduino Nano

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики плати Arduino Nano

Характеристика	Значення
Мікроконтролер	ATmega328P
Вхідна напруга (рекомендована)	7-12 В
Робоча напруга	5 В

Вхідна напруга (гранична)	6-20 В
Аналогові входи	6
Цифрові входи/виходи	14 (6 – виходи <a href="#">ШИМ</a> )
Постійний струм для виходу 3.3 В	50 мА
Постійний струм через входи/виходи	40 мА
Тактова частота	16 МГц
Підтримка інтерфейсів	SPI, I2C, Serial
Флеш-пам'ять	32 Кб (ATmega328P)
ОЗП	2 Кб (ATmega328P)
EEPROM	1 Кб (ATmega328P)

#### 2.4 Апаратна реалізація передавача та приймача

Пристрій «передавач/приймач» виконує роль антени, яка спочатку посиляє ультразвуковий імпульс та чекає на повернення ехо-сигналу. Враховуючи швидкість звуку у повітрі (~330 м/с), а також можливість руху об'єкта, сигнали подаються з високою частотою, щоб вловити найменші переміщення.

Після того, як ультразвуковий імпульс відбився від об'єкта, він повертається до антени, яка в цей момент працює, як приймач і фіксує ехо-сигнал.

Також, для розширення «поля зору» та покриття більшої площі, необхідно реалізувати можливість повороту антени за допомогою рухомого шарніру та привода для повороту.

Підсумовуючи усе перелічене вище, необхідно реалізувати пристрій, який буде передавати ультразвукові імпульси і приймати ехо-сигнали, а також матиме шарніри та привод у конструкції для повороту.

Найкращим варіантом буде використання ультразвукового далекоміра у якості «передавача/приймача» та серводвигуна або крокового двигуна для реалізації повороту антени.

**Ультразвуковий далекомір** — це пристрій для вимірювання відстані до об'єкта за допомогою ультразвукових хвиль. Він працює за принципом ехолокації: передає ультразвукові імпульси, які відбиваються від об'єкта, і

приймає відбиті хвилі. Час між передачею і прийомом хвилі дозволяє обчислити відстань до об'єкта [6].

Ультразвуковий далекомір являє собою комбінований пристрій, до складу якого входять:

- передавач – випромінює ультразвукові хвилі;
- приймач – отримує відбиті хвилі;
- контролер – обробляє дані та розраховує відстань на основі швидкості звуку і часу затримки.

До переваг ультразвукового далекоміру відносять простоту експлуатації, високу точність та можливість працювати майже у будь-яких умовах.

Таким чином, у якості антени для реалізації радіолокатора було обрано ультразвуковий далекомір, а саме HC-SR04, зовнішній вигляд та технічні характеристики якого наведено на рисунку 2.6 та у таблиці 2.2 відповідно.

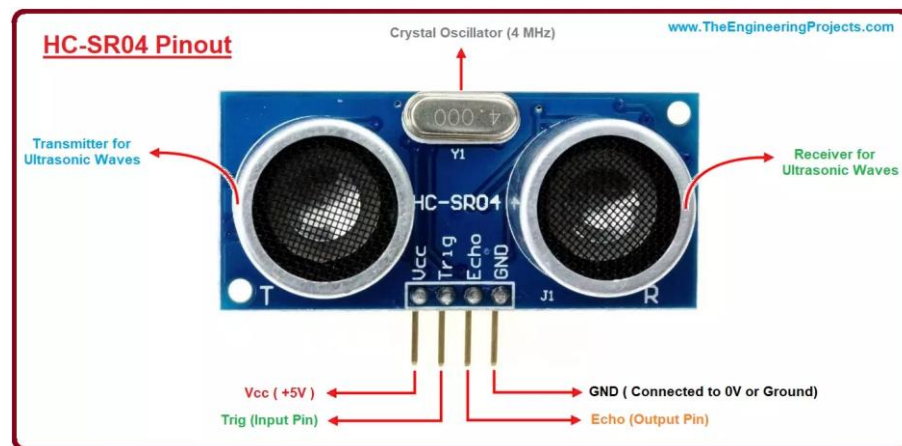


Рисунок 2.6 – Ультразвуковий далекомір HC-SR04

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики HC-SR04

Характеристика	Значення
Діапазон виміру відстані	2-400 см
Максимальна дальність	5м
Мінімальний діапазон	2см

Габаритні розміри (Д×Ш×В)	45x20x15 мм
Напруга живлення	5V DC
Роздільна здатність	0.3 см
Імпульс	10 мкс
ШІМ тривалість	від 150 мкс
Ефективний кут	<15°
Робоча частота	40 кГц
Робочий струм	15мА
Струм спокою	<2мА

Серводвигун – це механізм, що використовується для переміщення вихідного валу у визначене положення відповідно до сигналу управління і підтримання цього положення автоматично [7]. Він знаходить застосування в різних пристроях, де потрібно контрольоване обертання валу, наприклад, у відкритті або закритті клапанів та перемикачах. Ключові характеристики серводвигуна включають швидкість реакції, плавність руху та енергоефективність. На рисунку 2.7 представлено конструкцію серводвигуна.

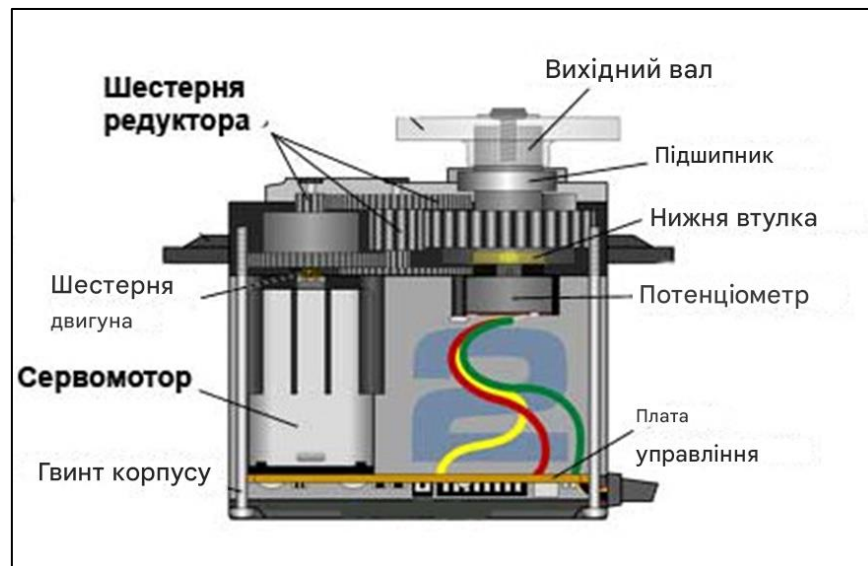


Рисунок 2.7 – Конструкція серводвигуна

Основними перевагами серводвигуна є його висока керованість та здатність точно встановлювати кут повороту валу. Однак недоліки включають

складну систему шестерень, що утворюють редуктор. Кожна з цих шестерень може стати потенційно слабкою ланкою в системі. Крім того, серводвигуни зазвичай мають відносно малий обертаючий момент на вихідному валу, що може обмежувати їх застосування у важких механічних навантаженнях.

Кроковий двигун — це синхронний безщітковий електродвигун, який має кілька обмоток статора [8]. Коли струм подається до однієї з обмоток, ротор фіксується в певному положенні. Послідовне подання сигналу на обмотки двигуна призводить до поступового, крокового обертання ротора, забезпечуючи дискретні кутові переміщення. На відміну від сервомотора, кроковий двигун має більш просту та надійну конструкцію, яку представлено на рисунку 2.8.

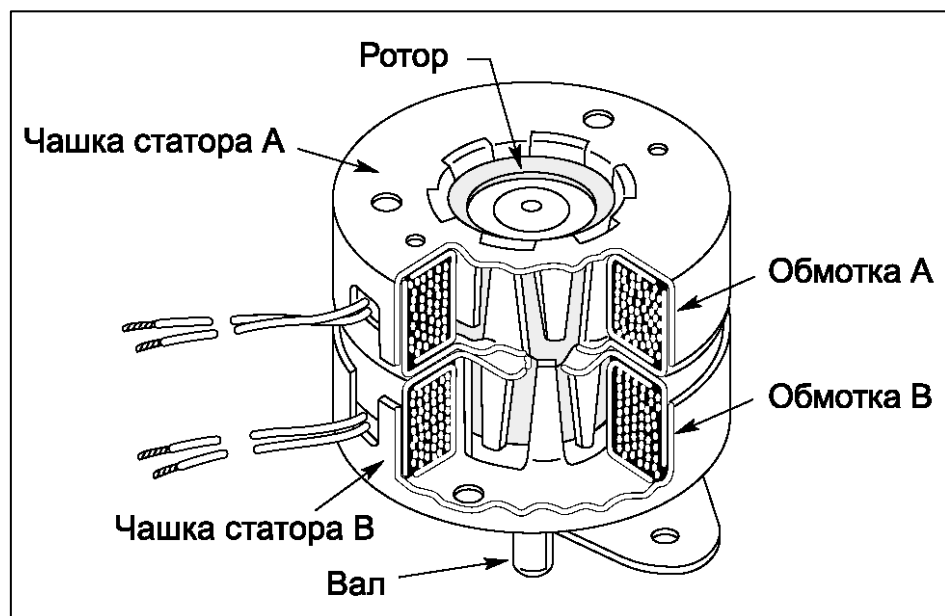


Рисунок 2.8 – Конструкція крокового електродвигуна

Переваги крокового двигуна включають його високу надійність та точну керуваність. Оскільки обертання відбувається за кроками, кожен крок відповідає точному куту повороту валу, що дозволяє легко контролювати положення. Додатково, кроковий двигун забезпечує контроль напрямку та швидкості обертання.

До недоліків можна віднести високу вартість таких двигунів, а також необхідність додаткового обладнання, зокрема драйвера, для керування кроковим двигуном.

Враховуючи те, що поворотний механізм у системі не відіграє головної ролі, було прийнято рішення для реалізації радіолокатора використати серводвигун, а саме MicroServo MG90S.

Зовнішній вигляд та технічні характеристики серводвигуна представлені на рисунку 2.9 та у таблиці 2.3 відповідно.



Рисунок 2.9 – Серводвигун MicroServo MG90S

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики MicroServo MG90S

Характеристика	Значення
Вага	14 г
Габаритні розміри (Д×Ш×В)	32×32×12 мм
Напруга живлення	4,8...6 В
Крутний момент	1,8...2,2 кг/см (при 4,8 В)
Час повороту на 60°	0,1с (при 4,8 В), 0,08с (при 6 В)
Робоча температура	-30...+60°C
Довжина проводів	24 см
Кут повороту	180°

Матеріал	метал
Висота валу	3.8 мм (+/- 0.1мм)

## 2.5 Апаратна реалізація підсистеми обробки даних та візуалізації

Як було описано у підрозділі 2.2, у якості пристрою обробки даних та візуалізації результату у зрозумілій для користувача формі, доцільно використовувати комп'ютер, проте не стандартний системний блок, а комп'ютер у компактному форм-факторі, наприклад одноплатний комп'ютер Raspberry Pi.

Raspberry Pi побудований на системі-на-чипі (SoC) Broadcom BCM2835, яка включає в себе процесор ARM із тактовою частотою 700 МГц, графічний процесор VideoCore IV, і 512 чи 256 мегабайтів оперативної пам'яті. Постійна пам'ять реалізована через SD-карту. Така апаратна начинка дозволяє відтворювати відео формату H.264 в роздільній здатності 1080р, що є дуже важливим фактором у проектуванні системі.

Зовнішній вигляд та основні технічні характеристики одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 4 представлені на рисунку 2.10 та у таблиці 2.4.

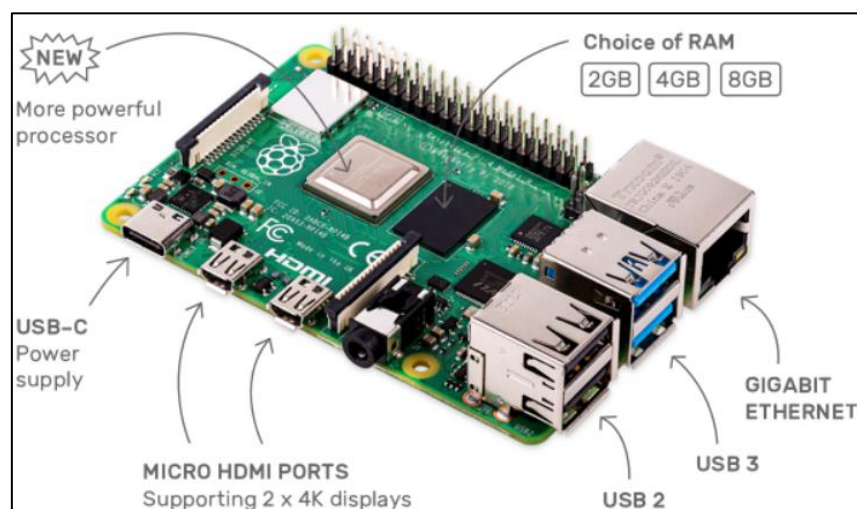


Рисунок 2.10 – Raspberry Pi 4

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики Raspberry Pi 4

Характеристика	Значення
System on a Crystal (SoC)	Broadcom BCM2711 (CPU + GPU)
Processor	ARMv8 Cortex-A72 (1,5 ГГц)
Graphics processor	VideoCore VI GPU
RAM	2/4/8 ГБ SDRAM LPDDR4
ROM	карта пам'яті MicroSD
Interfaces	DSI, Serial, I <sup>2</sup> C, TWI, SPI
Ports	2 x USB 3.0; 2 x USB 2.0; 2 x micro-HDMI; 1 x LAN
Wireless technologies	Wi-Fi 802.11b/g/n; Bluetooth 5.0
Feeding	5 В, 3.0А через порт USB type C або GPIO
OS	Ubuntu, Debian, Fedora, Arch Linux, Gentoo, RISC OS, Android, Firefox OS, NetBSD, FreeBSD, Slackware, Tiny Core Linux, Windows 10 IOT
Dimensions	85.6 мм x 56.5 мм x 17 мм
Weight	45 г

### 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

У попередньому розділі було детально розглянуто апаратну складову радіолокатора на базі мікроконтролера, а також представлено аргументований вибір конкретних технічних рішень для реалізації кожної частини проектованої системи. Проте для того, щоб система радіолокаційного сканування працювала треба реалізувати функціональну частину, а саме програмне забезпечення для контролера системи та програмне забезпечення для підсистеми обробки даних та візуалізації. У цьому розділі представлено розробку такого програмного забезпечення.

Програмне забезпечення (ПЗ) – сукупність програм системи обробки інформації і програмних документів, необхідних для експлуатації цих програм [4].

#### 3.1 Структура програмного забезпечення та вибір технологій

Структуру програмного забезпечення представлено на рисунку 3.1.

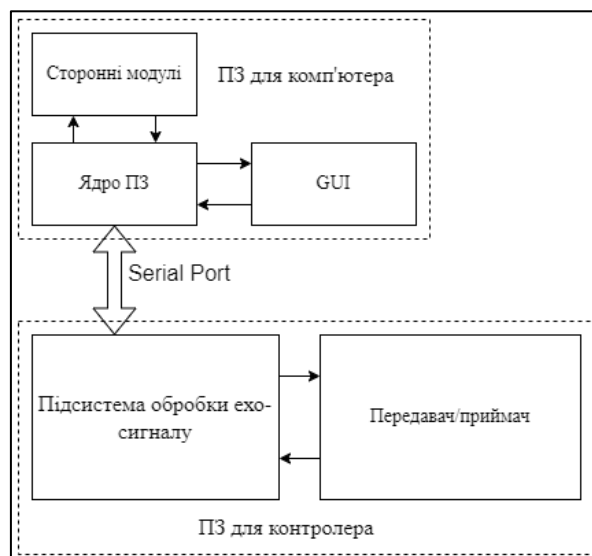


Рисунок 3.1 – Структура ПЗ проектованої системи

Як показано на рисунку 3.1, програмне забезпечення системи складається з двох основних компонентів: програмної частини для комп'ютера та програмної частини для контролера (плати Arduino). Ці компоненти взаємодіють через програмний та фізичний інтерфейс Serial Port. Кожен з компонентів, у свою чергу, поділяється на менші функціональні модулі. Програмна частина для комп'ютера включає в себе графічний інтерфейс користувача (GUI), додаткові модулі для забезпечення коректної роботи системи, а також основний функціональний блок, який відповідає за обробку даних та їх відображення у GUI. Програмна частина для контролера відповідає за збір і обробку даних, взаємодію з антеною, передачу керуючих сигналів, а також прийом і фіксацію відбитих сигналів.

Оскільки для технічної реалізації контролера використовується плата Arduino, програмне забезпечення контролера необхідно адаптувати для цієї платформи, що передбачає використання мови програмування C++ та середовища розробки Arduino IDE.

C++ — це компільована мова програмування загального призначення з жорсткою (статичною) типізацією. Вона підтримує різні програмні парадигми, включаючи процедурну, об'єктно-орієнтовану та узагальнену (шаблонну) програмування. C++ має широкий набір стандартних бібліотек, які включають часто використовувані структури даних, алгоритми, інструменти для введення-виведення даних, роботу з регулярними виразами, а також можливості для багатопоточних операцій. Мова поєднує властивості як високорівневих, так і низькорівневих мов програмування [9].

Інтегроване середовище розробки (IDE) — це набір інструментів, який використовується програмістами для створення програмного забезпечення [4].

Для програмування мікроконтролерів, які вбудовано до печатної плати Arduino використовується офіційне середовище розробки – ArduinoIDE, зовнішній вигляд якого представлено на рисунку 3.2.

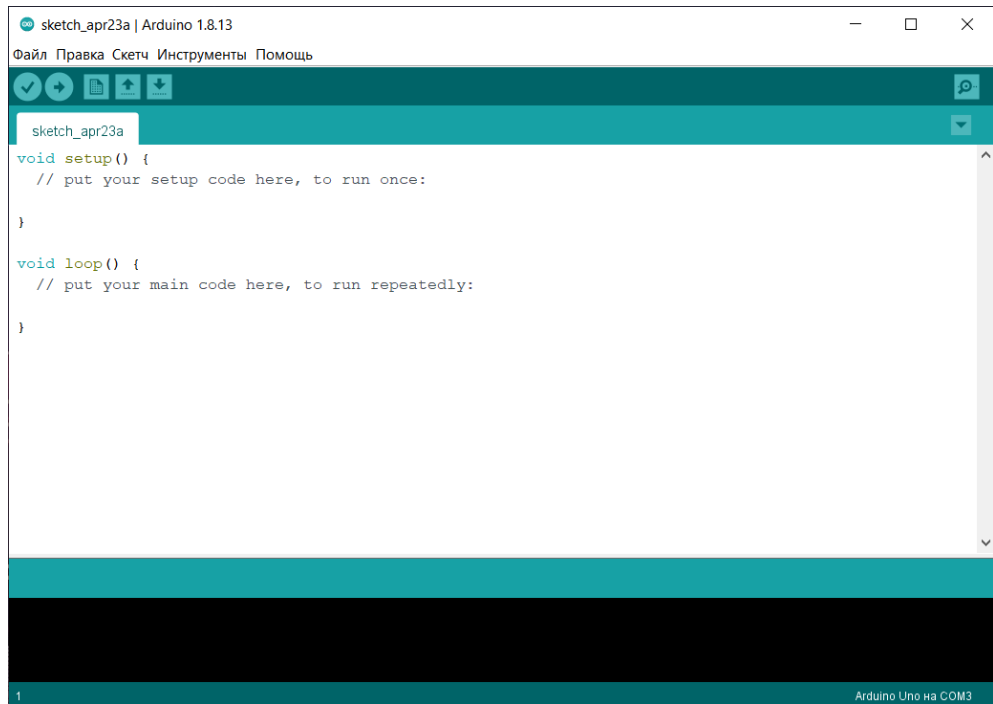
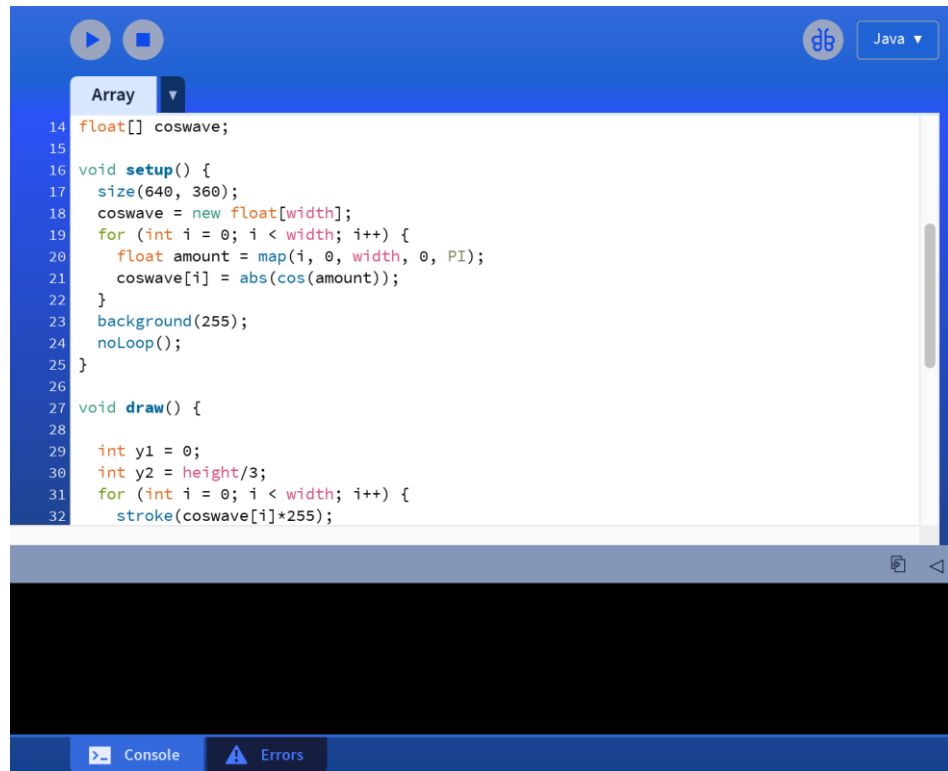


Рисунок 3.2 – ArduinoIDE

Для реалізації частини ПЗ, яка запускається та працює на комп'ютері, містить у собі GUI та «ядро ПЗ», вибір мов програмування ширший, адже підійде будь-яка сучасна мова програмування високого рівня, у якій є можливість реалізації та відтворення графічного інтерфейсу. З урахуванням того, що візуальну частину інтерфейсу (GUI) доцільно було б об'єднати з «ядром ПЗ», яке робить обробку сигналу, було прийнято рішення усю цю частину ПЗ реалізувати за допомогою технології Processing та мови програмування Java, адже вона відповідає усім необхідним критеріями вибору.

Processing — це мова програмування та інтегроване середовище розробки (IDE), створена для художників, дизайнерів та експериментаторів, які хочуть використовувати комп'ютерний код для графічних і мультимедійних проєктів. Processing базується на Java і пропонує спрощений синтаксис, щоб спростити створення візуальних ефектів, анімацій та інтерактивних програм. Ця мова підтримує об'єктно-орієнтоване програмування та надає велику кількість бібліотек для роботи з графікою,

звук, відео та взаємодією з апаратними пристроями, такими як Arduino. Processing широко використовується в освіті для навчання програмуванню завдяки своїй простоті та можливостям створювати швидкі прототипи [10]. Внутрішній інтерфейс Processing представлено на рисунку 3.3.



```
14 float[] coswave;
15
16 void setup() {
17   size(640, 360);
18   coswave = new float[width];
19   for (int i = 0; i < width; i++) {
20     float amount = map(i, 0, width, 0, PI);
21     coswave[i] = abs(cos(amount));
22   }
23   background(255);
24   noLoop();
25 }
26
27 void draw() {
28
29   int y1 = 0;
30   int y2 = height/3;
31   for (int i = 0; i < width; i++) {
32     stroke(coswave[i]*255);
```

Рисунок 3.3 – Processing

Java — це компільована мова програмування загального призначення з суворою статичною типізацією, створена для забезпечення надійності, портативності та безпеки. Java підтримує об'єктно-орієнтоване програмування та багатопоточність, що дозволяє створювати складні та масштабовані програми. Завдяки своїй віртуальній машині Java (JVM), програми написані на цій мові можуть працювати на будь-якій платформі, де доступна JVM, що забезпечує кросплатформену сумісність. Java широко використовується у великих корпоративних додатках, веб-додатках, мобільних додатках (зокрема для Android) і серверних системах [11].

### 3.2 Реалізація програмного забезпечення для контролера системи

Контролер є найважливішим компонентом системи, адже саме він поєднує у собі функціонал одразу декількох пристроїв, і саме він керує антеною та проводить попередню обробку ехо-сигналу. Саме тому, ПЗ контролера повинно описувати повний функціонал і бути стійким до помилок.

Нижче наведено декілька лістингів коду програмного забезпечення для контролеру плати Arduino. Повний код цієї частини ПЗ наведено у додатку В.

Перше, що повинен робити контролер це подавати керуючий сигнал на антену, щоб вона працювала у режимі «передавача» та подавала ультразвукові імпульси з деякою періодичністю. Далі, коли сигнал відбивається від об'єкту радіолокації, він повертається до антени у вигляді ехо-сигналу, який фіксується чутливими компонентами антени та передається до контролера у вигляді сигналу. Після цього контролер проводить відцифровування сигналу та обчислення відстані до об'єкта.

#### Лістинг 3.1 – Код для обчислення відстані до об'єкта

```
int calDist() {
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(trigPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    duration = pulseIn(echoPin, HIGH);
    distance = duration*0.034/2;
    return distance;
}
```

Окрім керування антеною, контролер ще керує поворотним механізмом, щоб повертати антену, тим самим збільшуючи поле зору системи. Апаратно

поворотний механізм реалізовано за допомогою серводвигуна, тож ПЗ повинно керувати цим самим серводвигуном.

### Лістинг 3.2 – Код для керування поворотним механізмом системи

```
for(int i=15;i<=165;i++){
    servo.write(i);
    delay(30);
for(int i=165;i>15;i--){
    servo.write(i);
    delay(30);
```

Для зручності реалізації обміну даними між контролером та підсистемами обробки даних та візуалізації було прийнято рішення використати принцип пакетів даних, тобто контролер обчислює відстані до об'єкта протягом якогось часу, а потім формує пакет даних і відправляє їх на комп'ютер через послідовний порт.

### Лістинг 3.3 – Код для передачі пакета даних на комп'ютер

```
Serial.print(i);
Serial.print(",");
Serial.print(distance);
Serial.print(".");
```

### Лістинг 3.4 – Код функції setup()

```
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(trigPin, OUTPUT);
    pinMode(echoPin, INPUT);
    servo.attach(10);}
```

Весь код з лістингів 3.1 – 3.3 розміщується у стандартній функції loop(), яка є нескінченним циклом, тож система працюватиме допоки буде живлення контролера.

### 3.3 Реалізація програмного забезпечення для комп'ютера

У попередньому підрозділі було детально описано частину програмного забезпечення системи, яка реалізує керування передавачем/приймачем та проводить обчислення дистанції до об'єкта, а також описано принцип обміну даними між платою та комп'ютером через пакети даних. У цьому підрозділі представлено детальний опис частини ПЗ системи, яка реалізує функціонал обробки даних та графічного інтерфейсу, а саме, обчислення значень сигналів та візуалізація цих даних у зрозумілій для користувача формі. Нижче наведено кілька лістингів коду цієї частини ПЗ, а повний код наведено у додатку Г.

Уся програма цієї частини ПЗ системи представляє собою головну функцію draw(), яка переводить сигнали, що надходять з контролера у такий вигляд, щоб їх можна було візуалізувати за допомогою реалізованого інтерфейсу.

#### Лістинг 3.5 – Код головної функції draw()

```
void draw() {  
    fill(0,5);  
    noStroke();  
    rect(0, 0, width, height*0.93);  
    noStroke(); fill(0,255);  
    rect(0,height*0.93,width,height);  
    drawRadar();  
    drawLine();  
    drawObject();  
    drawText();}
```

Як видно з лістингу 3.5, функція `draw()` викликає інші функції, які реалізують інтерфейс для візуалізації даних, а також перетворення вхідних даних у необхідний формат.

### Лістинг 3.6 – Код функції `drawRadar()`

```
void drawRadar() {
    pushMatrix();
    noFill();
    stroke(10,255,10);
    strokeWeight(3);
    translate(width/2,height-height*0.06);
    line(-width/2,0,width/2,0);
    arc(0,0,(width*0.5),(width*0.5),PI,TWO_PI);
    arc(0,0,(width*0.25),(width*0.25),PI,TWO_PI);
    arc(0,0,(width*0.75),(width*0.75),PI,TWO_PI);
    arc(0,0,(width*0.95),(width*0.95),PI,TWO_PI);
    line(0,0,(-width/2)*cos(radians(30)),(-
width/2)*sin(radians(30)));
    line(0,0,(-width/2)*cos(radians(60)),(-
width/2)*sin(radians(60)));
    line(0,0,(-width/2)*cos(radians(90)),(-
width/2)*sin(radians(90)));
    line(0,0,(-width/2)*cos(radians(120)),(-
width/2)*sin(radians(120)));
    line(0,0,(-width/2)*cos(radians(150)),(-
width/2)*sin(radians(150)));
    stroke(175,255,175);
    strokeWeight(1);
    line(0,0,(-width/2)*cos(radians(15)),(-
width/2)*sin(radians(15)));
    line(0,0,(-width/2)*cos(radians(45)),(-
width/2)*sin(radians(45)));
```

```

        line(0,0,(-width/2)*cos(radians(75)),(-
width/2)*sin(radians(75)));
        line(0,0,(-width/2)*cos(radians(105)),(-
width/2)*sin(radians(105)));
        line(0,0,(-width/2)*cos(radians(135)),(-
width/2)*sin(radians(135)));
        line(0,0,(-width/2)*cos(radians(165)),(-
width/2)*sin(radians(165)));
        popMatrix();
    }

```

### Лістинг 3.7 – Код функції drawLine()

```

void drawLine(){
    pushMatrix();
    strokeWeight(9);
    stroke(0,255,0);
    translate(width/2,height-height*0.06);
    line(0,0,(width/2)*cos(radians(angle)),(-
width/2)*sin(radians(angle)));
    popMatrix();
}

```

У лістингах 3.6 та 3.7 представлено коди функцій, які реалізують інтерфейс радіолокатора таким чином, щоб інформація про об'єкти, що виявляються системою була представлена в зрозумілій для користувача графічній формі.

### Лістинг 3.8 – Код функції drawObject()

```

void drawObject(){
    pushMatrix();
    strokeWeight(9);

```

```

stroke(255,0,0);
translate(width/2,height-height*0.06);
float pixleDist = (dist/40.0)*(width/2.0);
float pd=(width/2)-pixleDist;
float x=-pixleDist*cos(radians(angle));
float y=-pixleDist*sin(radians(angle));
if(dist<=40){
    line(-x,y,-x+(pd*cos(radians(angle))),y-
(pd*sin(radians(angle))));
}
popMatrix();
}

```

У лістингу 3.8 представлено код функції, яка відображає об'єкт на інтерфейсі попередньо обчислюючи параметри об'єкта, які було отримано з контролера.

### Лістинг 3.9 – Код функції serialEvent()

```

void serialEvent (Serial myPort) {
    data = myPort.readStringUntil('.');
    data = data.substring(0,data.length()-1);
    int index1 = data.indexOf(",");
    ang= data.substring(0, index1);
    distance= data.substring(index1+1, data.length());
    angle = int(ang);
    dist = int(distance);
}

```

У лістингу 3.9 представлено код функції, яка зчитує пакет даних з послідовного порта, до якого підключено контролер та розкладає пакет на окремі сигнали і перетворює у необхідний формат.

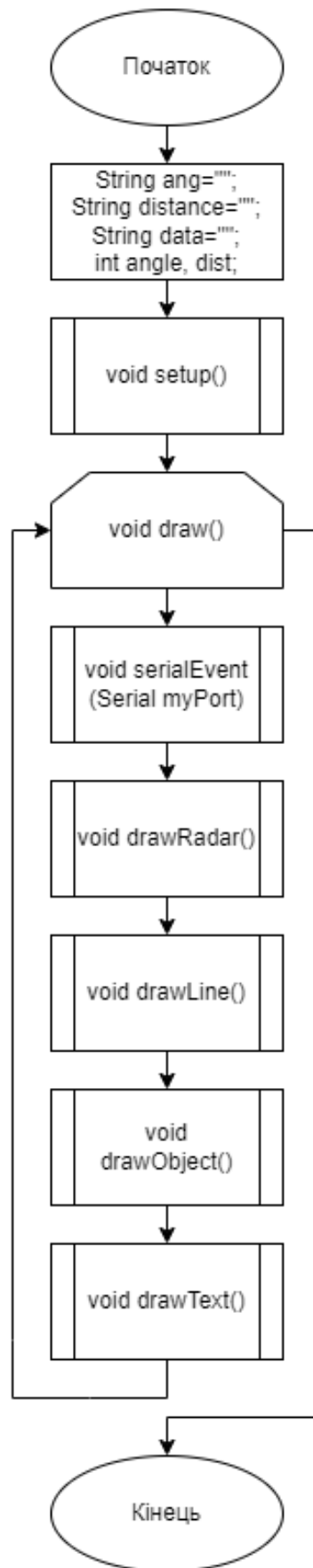


Рисунок 3.4 – Узагальнений алгоритм ПЗ

Як показано на рисунку 3.4, принцип роботи програмного забезпечення комп'ютера наступний: після запуску програми на екран виводиться головне вікно інтерфейсу з усіма необхідними елементами. Контролер одразу передає керуючий сигнал антені, яка посилає ультразвукові імпульси, окрім цього контролер передає сигнал на поворотний механізм. Як тільки антена фіксує ехо-сигнал, який відбився від об'єкта, система отримує пакет даних з відстанню до цього об'єкта і відображає ці дані на інтерфейсі. Чим ближче об'єкт до радіолокатора, тим більше його графічне відображення на інтерфейсі.

Також у програмі передбачена обробка помилок, наприклад жодної плати Arduino не підключено до комп'ютера, або дані з якогось електронного компонента системи не коректні чи виникнення іншої помилки у системі, у такому випадку, на екран виводиться спеціальне повідомлення.

Програма працює у нескінченному циклі, тож доки є електроживлення у системі, доти і буде працювати радіолокатор.

## 4 ДОСЛІДНА ЕКСПЛУАТАЦІЯ МАКЕТНОГО ЗРАЗКА

У попередніх розділах було проведено глибоке вивчення предметної області та теоретичних основ, які необхідні для розробки. Було детально досліджено методи і технології, що застосовуються в радіолокаційному скануванні. Розроблено як апаратну частину системи, так і програмне забезпечення для контролера на базі плати Arduino і комп'ютера. Щоб підтвердити функціональність і ефективність створеної системи, необхідно провести тестову експлуатацію прототипу. Це включає збір апаратної частини і запуск програмного забезпечення в умовах, максимально наближених до реальних, у яких користувач буде використовувати систему.

### 4.1 Опис макетного зразка та методики випробувань

Моделювання функціонування макетного зразка системи слід проводити в умовах, які максимально наближені до тих, в яких система буде використовуватися кінцевим користувачем. Спочатку потрібно зібрати апаратну частину, після чого запустити програмне забезпечення і провести тестування.

Оскільки основний акцент у кваліфікаційній роботі зроблено на розробку програмного забезпечення, доцільно використовувати готові технічні рішення для апаратної частини. Усі компоненти системи підключаються до плати Arduino за допомогою спеціальних проводів, а плата підключається до комп'ютера через USB-кабель до COM-порту. Для спрощення процесу збирання та запобігання плутанини з проводами, раціонально використовувати макетну плату (breadboard). Зовнішній вигляд зібраної апаратної частини показаний на рисунку 4.1.

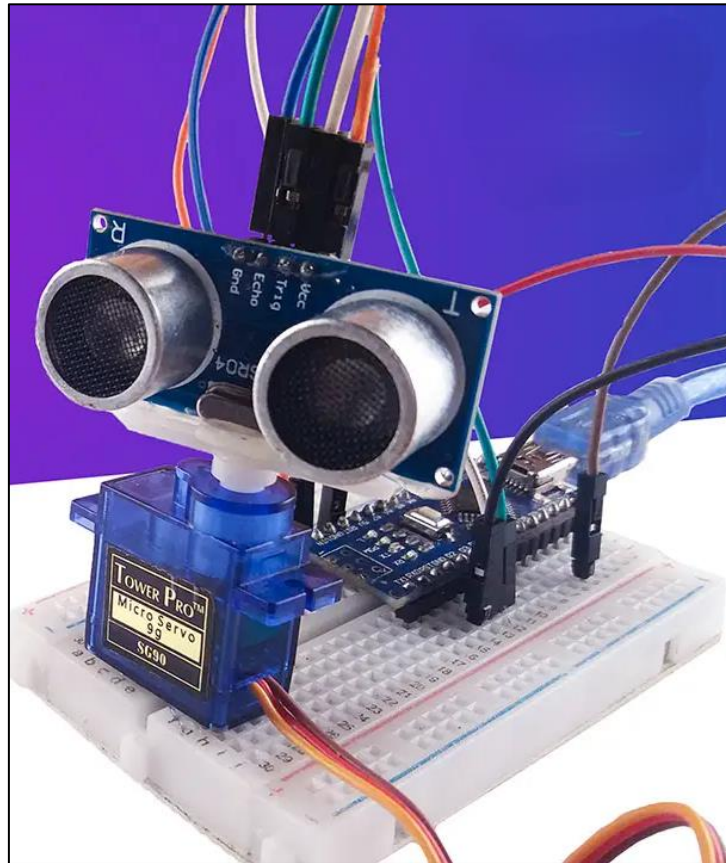


Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд апаратної частини радіолокатора

Після того, як апаратна частина системи завершена, потрібно завантажити до мікроконтролера плати Arduino відповідне програмне забезпечення, яке забезпечує роботу контролера радіолокатора. Це ПЗ відповідає за збір та обробку даних від датчиків і контроль над роботою системи. Інша частина програмного забезпечення, яка включає графічний інтерфейс (GUI), виконується на комп'ютері, до якого підключена плата. Цей інтерфейс дозволяє користувачеві взаємодіяти з системою, відобразити результати сканування та здійснювати налаштування. Далі необхідно провести тестування розробленої системи, яке складається з наступних етапів:

1. Запуск системи;
2. Перевірка правильності відображення графічного інтерфейсу;
3. Перевірка роботи передавача/приймача;
4. Перевірка роботи поворотного механізму системи;

5. Перевірка правильності відображення об'єктів, що були зафіксовані антеною на графічному інтерфейсі;
6. Перевірка часу відгуку системи та таймаутів;
7. Перевірка відпрацювання нестандартних ситуацій, за яких виникають помилки у системі.

Результати тестування макетного зразка проектованої системи представлені у наступному підрозділі.

#### 4.2 Результати моделювання роботи тестового зразка

Спочатку необхідно перевірити запуск системи, тобто роботу програмного забезпечення відповідно до заданого сценарію, а також перевірити його поведінку в умовах виникнення помилок. Після цього слід протестувати графічний інтерфейс: впевнитися, що всі елементи керування відображаються правильно та знаходяться на своїх місцях, як передбачено в програмі. Важливо також перевірити, чи всі елементи доступні для користувача і виконують свої функції повністю, згідно з вимогами програмного забезпечення.

Результати запуску та перевірки відображення графічного інтерфейсу системи радіолокаційного сканування після підключення плати контролера системи до комп'ютера представлено на рисунках 4.2.

Після перевірки правильності відображення інтерфейсу системи, необхідно перевірити працездатність радіолокатора та поворотного механізму, для цього на контролер системи подається електроживлення.

Коли передавач/приймач, у вигляді ультразвукового далекоміру, фіксує об'єкт на достатній відстані, на екрані інтерфейсу з'являються червоні лінії, які сигналізують про те, що в полі зору радіолокатора є об'єкт і на якій він знаходиться відстані. Результат роботи системи радіолокаційного сканування у випадку, коли є фіксація об'єкта, наведено на рисунку 4.3.

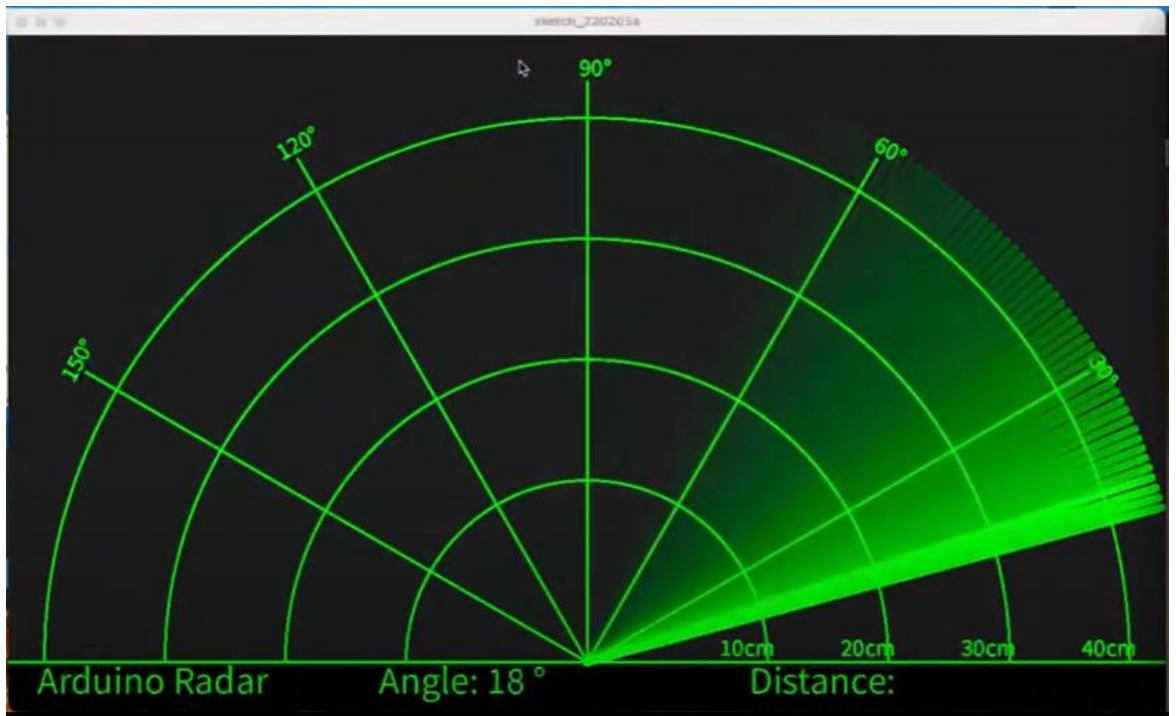


Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд графічного інтерфейсу системи

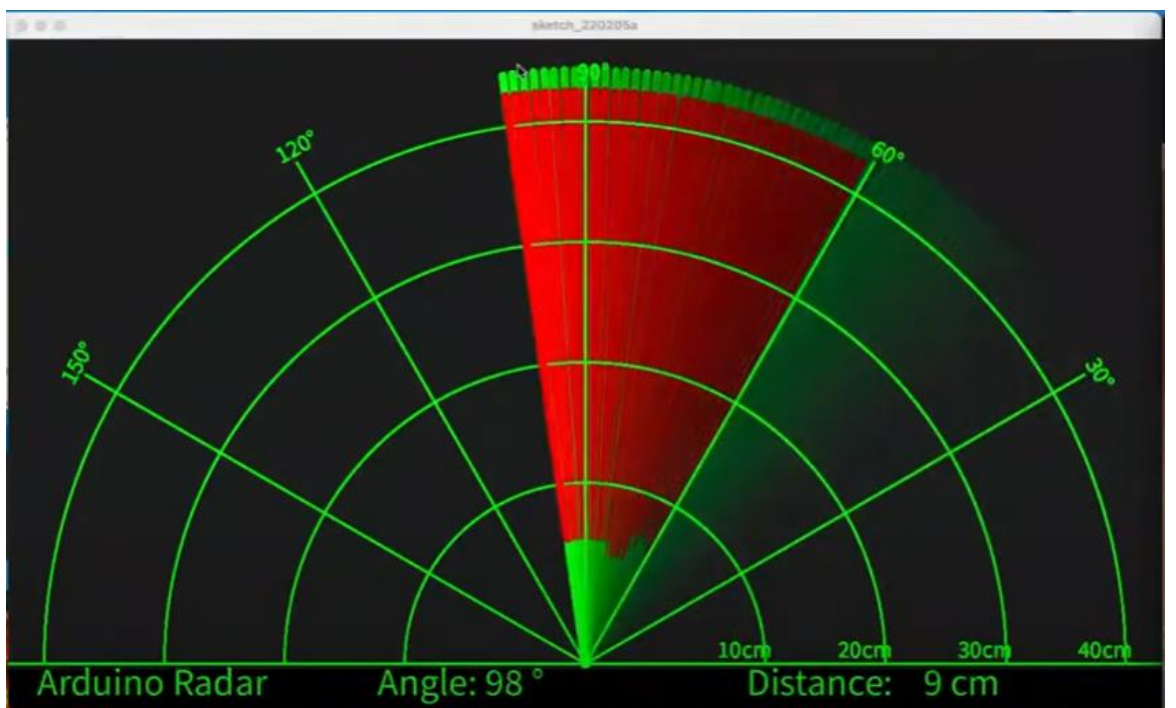


Рисунок 4.3 – Реакція системи на фіксацію об'єкта при скануванні

Наступним етапом тестування є перевірка часових затримок у системі та відпрацювання виключень з функціоналу. Тести показали невеликі часові затримки між моментом фіксації об'єкта та відображенням результату на екрані, але враховуючи обчислювальні потужності використаних компонентів, ці затримки знаходяться в межах норми. Обробка виключень з функціоналу системи також працює коректно, що дозволяє системі працювати без збоїв.

Згідно з результатами проведених тестувань, розроблена система функціонує відповідно до вимог програмного забезпечення. Вона успішно пройшла всі етапи тестування, продемонструвавши належну працездатність і ефективність. Елементи графічного інтерфейсу відображаються коректно і розташовані згідно з передбаченим макетом у ПЗ. Функціональні можливості системи також виконуються без збоїв, а час реакції на дії користувача відповідає очікуваним таймаутам. Випадки, коли виникають помилки або несправності, обробляються правильно, як це було закладено у ПЗ. Важливо зауважити, що реальна продуктивність системи може відрізнятись в умовах експлуатації, оскільки під час тестування використовувався макетний стенд. У ході тестування збоїв у роботі системи не зафіксовано.

## ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було розроблено систему радіолокаційного сканування на базі мікроконтролера Arduino Nano, яка використовує ультразвуковий далекомір для визначення відстані до об'єктів та серводвигун для управління напрямком сканування. Графічний інтерфейс системи реалізовано на мові програмування Processing, що дозволяє користувачеві взаємодіяти із системою у зрозумілий і зручний спосіб.

У першому розділі роботи було проведено дослідження предметної області радіолокаційного сканування, розглянуто принципи дії радіолокаційних систем та можливість використання мікроконтролерів для їх реалізації. На основі цього було зроблено висновок, що створення такої системи з використанням доступних компонентів, таких як плата Arduino Nano, є доцільним та ефективним рішенням для освітніх і дослідницьких цілей.

У другому розділі детально описано розробку апаратної частини системи, зокрема підключення ультразвукового далекоміра та серводвигуна до мікроконтролера. Ці компоненти дозволяють реалізувати процес сканування навколишнього простору і визначати відстані до об'єктів у різних напрямках.

Третій розділ присвячено розробці програмного забезпечення. Програмне забезпечення для мікроконтролера написано на мові програмування C++ з використанням середовища розробки ArduinoIDE. Інтерфейс для користувача реалізовано на платформі Processing, що дозволяє візуалізувати дані радіолокаційного сканування та надавати зворотний зв'язок у режимі реального часу.

Заключний розділ містить результати тестування системи. Під час дослідної експлуатації макетного зразка було підтверджено працездатність та

ефективність системи. Графічний інтерфейс коректно відображав отримані дані, а система працювала стабільно без збоїв.

Таким чином, розроблена система радіолокаційного сканування на базі мікроконтролера Arduino Nano успішно виконує свої функції та може бути використана як навчальний або експериментальний інструмент.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Радіолокація [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – Електронні данні. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F>
2. Радіолокаційна станція [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – Електронні данні. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D0%B0%D1%80>
3. Функціональна схема радару [Електронний ресурс] // RadarTutorial: офіційний сайт. – Електронні данні. – Режим доступу: <https://www.radartutorial.eu/01.basics>
4. Півняк Г. Г., Бусигін Б. С., Дівізінюк М. М. Тлумачний словник з інформатики. — Д.: Національний гірничий університет, 2010. — 392 с. — ISBN 978-966-350-306-0.
5. Arduino Nano [Електронний ресурс] // Arduino: офіційний сайт. – Електронні данні. – Режим доступу: <https://www.arduino.cc/>
6. Ультразвуковий далекомір [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – Електронні данні. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Ультразвуковий-далекомір>
7. Серво-двигун [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – Електронні данні. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Серво-двигун>
8. Кроковий двигун [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – Електронні данні. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Кроковий-двигун>
9. C++ [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – Електронні данні. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/C++>

10. Processing [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Processing>
11. Java [Електронний ресурс] // Вікіпедія: вільна енциклопедія. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Java>
12. C++ Programming: Principles and Practice Using C++ / Bjarne Stroustrup. — Addison-Wesley Professional, 2014. — 1312 p. — ISBN 978-0321992789.
13. Effective Java / Joshua Bloch. — Addison-Wesley, 2018. — 416 p. — ISBN 978-0134685991.
14. Learning Processing: A Beginner's Guide to Programming Images, Animation, and Interaction / Daniel Shiffman. — Morgan Kaufmann, 2015. — 564 p. — ISBN 978-0123944436.