

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування комп'ютерної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Система ультразвукового сканування навколишнього середовища
на основі мікроконтролера NodeMCU

(тема)

Виконав:

студент курсу, групи СКСм-22-2
Гречмак Д.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність СКСм-22-2
123 – Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма
Спеціалізовані комп'ютерні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник: Литвинова Є.І.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри Чумаченко С.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління

Кафедра Автоматизації проектування комп'ютерної техніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва)

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

Освітня програма Спеціалізовані комп'ютерні системи
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

_____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Гречмаку Дмитру Вікторовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система ультразвукового сканування навколишнього середовища на основі мікроконтролера NodeMCU

затверджена наказом по університету від "03" 11 2023 р. № 1282Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____

3. Вхідні дані до роботи функція – ультразвукове сканування навколишнього середовища; використовуване апаратне забезпечення – мікроконтролер NodeMCU, ультразвуковий вимірювач HC-SR04; використовуване програмне забезпечення – інтегроване середовище розробки Visual Studio Code, мова програмування C#;

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

Вступ. Аналіз предметної галузі та постановка задачі проектування. Огляд літератури за темою роботи. Розробка структури системи ультразвукового сканування навколишнього середовища. Розробка програмних і апаратних компонентів системи сканування навколишнього середовища. Моделювання компонентів системи сканування навколишнього середовища. Висновки. Перелік посилань. Додатки.

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

15 слайдів


6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)


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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	06.11.2023	
2	Аналіз предметної галузі та постановка задачі проектування	06.11.2023-15.11.2023	
3	Огляд літератури за темою роботи	16.11.2023-30.11.2023	
4	Розробка структури системи ультразвукового сканування навколишнього середовища	01.12.2023-15.12.2023	
5	Розробка програмних і апаратних компонентів системи ультразвукового сканування навколишнього середовища	16.12.2023-25.12.2023	
6	Моделювання системи ультразвукового сканування навколишнього середовища	26.12.2023-31.12.2023	
7	Оформлення пояснювальної записки	02.01.2024 -10.01.2024	
8	Оформлення графічного матеріалу	11.01.2024 -15.01.2024	
9	Представлення кваліфікаційної роботи в ДЕК	19.01.2024	

Дата видачі завдання 06.11.2023 р.

Студент 
(підпис)

Керівник роботи 
(Ім'я)

проф. Литвинова Є.І.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Записка пояснювальна до кваліфікаційної роботи: 71 сторінка, 30 рисунків, 5 таблиць, 1 додаток, 44 джерела посилання.

NODEMCU, ESP8266, МІКРОКОНТРОЛЕР, HYPER TEXT TRANSFER PROTOCOL, УЛЬТРАЗВУКОВЕ СКАНУВАННЯ

Мета кваліфікаційної роботи – зменшення вартості та підвищення продуктивності системи ультразвукового сканування навколишнього середовища за рахунок використання мікроконтролера NodeMCU.

Результати кваліфікаційної роботи полягають у розробці структури, програмного та апаратного забезпечення системи ультразвукового сканування навколишнього середовища. Обумовлено вибір мови програмування і технологій для розробки програмного застосунка з керування налаштуваннями мікроконтролера в цілях завдання режиму роботи та візуалізації результатів вимірювання.

Моделювання розробленого пристрою проводилося на макеті спрощеної схемної реалізації та організації бездротового зв'язку між контролером та програмним застосунком.

ABSTRACT

Masters Diploma Theses: 71 pages, 30 figures, 5 tables, 1 appendix, 44 sources.

NODEMCU, ESP8266, MICROCONTROLLER, HYPER TEXT TRANSFER PROTOCOL, ULTRASONIC SCANNING

The goal of the qualification work is to reduce the cost and increase the performance of the system of ultrasonic scanning of the environment due to the use of the NodeMCU microcontroller.

The results of the qualification work consist in the development of the structure, software and hardware of the system of ultrasonic scanning of the environment. The selection of a programming language and technologies for the development of a software application for controlling the microcontroller settings for the purpose of setting the operating mode and visualizing the measurement results is determined.

Modeling of the developed device was carried out on the mock-up of the simplified schematic implementation and organization of wireless communication between the controller and the software application.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	9
1.1 Огляд існуючих реалізацій	9
1.2 Аналіз існуючих датчиків ультразвукового вимірювання.....	12
1.3 Аналіз галузей застосування ультразвукового вимірювання	15
1.4 Використання системи радарів для спостереження за ціллю	21
1.5 Аналіз наявних архітектур мікроконтролерів	30
1.6 Аналіз наявних мікроконтролерів	35
1.7 Постановка завдання	56
2 ОПИС СТРУКТУРИ СИСТЕМИ	57
2.1 Опис обраної апаратної частини.....	57
2.2 Опис обраних мов програмування	59
2.3 Опис обраних датчиків вимірювання дистанції	61
2.4 Схема пристрою	62
2.5 Результати моделювання системи	63
ВИСНОВКИ	65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	67
ДОДАТОК А ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	72
ДОДАТОК Б ЛІСТИНГИ ПРОГРАМ	78

ВСТУП

Система ультразвукового сканування навколишнього середовища використовує ультразвукові хвилі для вимірювання відстаней і створення зображень об'єктів і поверхонь. Системи ультразвукового сканування можна використовувати для різних галузей, таких як картографія, медична візуалізація та робототехніка. У цій роботі представлено дослідження систем ультразвукового сканування для застосування в картографії, особливо для віддалених місць на планеті, таких як Арктика, або для використання в побутових цілях, таких як створення об'ємної моделі кімнати, тощо. Система може сканувати об'єкти будь-якої форми. У дослідженні обговорюються функціональні можливості, впровадження та продуктивність системи, а також проблеми та обмеження технології ультразвукового сканування.

Системи ультразвукового сканування можна використовувати в картографії для вимірювання відстаней і створення зображень важкодоступних ділянок, таких як трубопроводи, печери, тунелі тощо. Нижче наведено кілька прикладів систем ультразвукового сканування для картографії.

Високоєфективна скануюча акусто-ультразвукова система, розроблена NASA для зображення мікроструктурних особливостей і дефектів всередині пластинчастих зразків матеріалів. В ній використовується широкосмуговий передавальний ультразвуковий перетворювач і приймальний перетворювач, встановлені на керованих комп'ютером моторизованих столиках трансляції для сканування поверхні зразка. Застосовано пневматичний привод із датчиком навантаження для забезпечення контрольованої контактної сили. Система аналізує загальний (багатомодовий) акусто-ультразвуковий відгук зразка за допомогою спеціального програмного забезпечення, яке виділяє параметри сигналів у часовій і частотній областях. Система може відобразити

форми хвиль і спектральну щільність потужності в реальному часі, а також зображення після сканування [45].

Ультразвукова скануюча система для вимірювання відстаней і створення зображень важкодоступних ділянок, таких як трубопроводи. Система використовує сім ультразвукових датчиків HC-SR04, встановлених на серводвигуні, для сканування об'єктів круглої та квадратної форми. Для зв'язку з комп'ютером використовується адаптер Bluetooth і адаптер SD-карти. Система може будувати комп'ютерні графіки залежності відстаней від кутів [46].

Отже, системи ультразвукового сканування мають багато галузей використання, розробка такої системи може принести багато користі, зокрема для картографічних цілей, тому дослідження є актуальним.

Мета кваліфікаційної роботи – зменшення вартості та підвищення продуктивності системи ультразвукового сканування навколишнього середовища за рахунок використання мікроконтролера NodeMCU.

Задачі дослідження:

- розробка структури системи ультразвукового сканування навколишнього середовища;
- розробка програмних і апаратних компонентів системи ультразвукового сканування навколишнього середовища;
- моделювання компонентів системи сканування навколишнього середовища.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Огляд існуючих реалізацій

Одна з відомих реалізацій системи ультразвукового сканування – це система представлена NASA. Високоєфективна скануюча акусто-ультразвукова система, знаходиться в стадії розробки, її основа ціль - це забезпечення розширених можливостей для зображення мікроструктурних особливостей, включаючи дефекти, всередині пластинчастих зразків матеріалів. Очікується, що система буде особливо корисною в аналізі дефектів, які сприяють виникненню руйнувань у композиційних матеріалах з полімерною та керамічною матрицею, які важко охарактеризувати звичайними ультразвуковими методами сканування та іншими звичайними методами неруйнівного контролю [45].

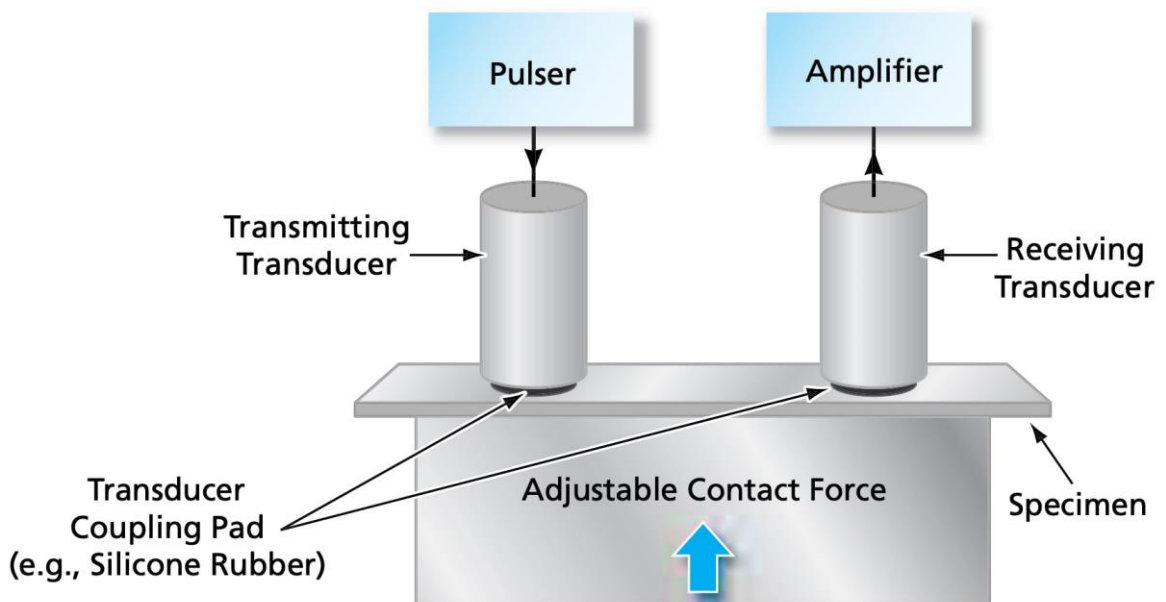


Рисунок 1.1 – Структура ультразвукового апарату

Базовий акусто-ультразвуковий апарат (рис. 1.1) включає в себе передавальні перетворювачі та приймальні перетворювачі в різних місцях на одній стороні зразка пластини.

Коротко підсумовуючи: акусто-ультразвуковий метод передбачає використання апарату, подібного до зображеного на рис. 1.1. Імпульси збуджуються в одному місці на поверхні зразка пластини за допомогою широкосмугового передавального ультразвукового перетворювача. Хвилі напруги, пов'язані з цими імпульсами, поширюються вздовж зразка до приймального перетворювача в іншому місці на тій самій поверхні. По дорозі хвилі напруги взаємодіють з мікроструктурою та дефектами, наявними між перетворювачами. Отриманий сигнал аналізується для оцінки мікроструктури та дефектів.

Конкретний варіант акусто-ультразвукового методу, реалізований у цій системі розробки, виходить за рамки основного принципу, описаного вище, і включає такі основні додаткові функції:

а) керовані комп'ютером моторизовані ступені трансляції використовуються для автоматичного позиціонування перетворювачів у визначених місцях. Сканування виконується в тому сенсі, що процеси вимірювання, збору та аналізу даних повторюються в різних визначених місцях перетворювача в масиві, який охоплює поверхню зразка (або визначену частину поверхні);

б) пневматичний привід із тензодатчиком використовується для застосування контрольованої контактної сили.

Під час аналізу даних вимірювання для кожної пари місць розташування перетворювача в скануванні використовується загальна акусто-ультразвукова відповідь зразка. Аналіз виконується спеціальним програмним забезпеченням, яке виділяє параметри сигналів у часовій і частотній областях.

Апаратне та програмне забезпечення комп'ютера забезпечують обробку та відображення як у реальному часі, так і після сканування. Наприклад, осцилографи (рис. 1.2) відображають форми хвиль і спектральну густину потужності доступні в режимі реального часу. Зображення можна обчислювати під час сканування.



Рисунок 1.2 – Осцилограф

Сигнали можуть піддаватися попередній цифровій обробці та/або постобробці за допомогою фільтрації, вікон, сегментації за часом і запуску алгоритмів усереднення форми сигналу. Крім того, програмне забезпечення надає варіанти для автономного моделювання процесів збору даних і сканування форми сигналу.

Під час випробувань було показано, що система здатна характеризувати мікроструктурні зміни та дефекти в композитах з керамічною матрицею SiC/SiC і C/SiC. Відшарування, варіації щільності, мікроструктурні зміни, пов'язані з проникненням кремнію, і ознаки простору тріщин (визначені в наступному реченні) були виявлені на зображеннях, сформованих на основі кількох параметрів часової та частотної області скануючих акусто-ультразвукових сигналів. Індикатори простору тріщин були елементами зображення, які не були виявлені іншими методами неруйнівного контролю, і названі так тому, що виявилось, що вони позначають місця, де зрештою виникли тріщини.

1.2 Аналіз існуючих датчиків ультразвукового вимірювання

Датчики для ультразвукового сканування - це пристрої, які генерують і виявляють ультразвукові хвилі. Ультразвукові хвилі — це високочастотні звукові хвилі, які можуть відбиватися від предметів і поверхонь, вимірювати відстані та створювати зображення. Датчики для ультразвукового сканування можна класифікувати на два типи: передавачі та приймачі.

Передавачі - це датчики, які випромінюють ультразвукові імпульси. Вони можуть бути п'єзоелектричними або магнітострикційними перетворювачами, які перетворюють електричні або магнітні сигнали в механічні коливання. Передавачі також можуть мати різні форми та розміри залежно від частоти та спрямованості звукових хвиль.

Приймачі - це датчики, які виявляють і посилюють відбиті від об'єктів і поверхонь відлуння. Вони можуть бути п'єзоелектричними або мікрофонними перетворювачами, які перетворюють механічні або акустичні сигнали в електричні. Приймачі також можуть мати різну форму та розмір залежно від частоти та чутливості звукових хвиль.

Датчики для ультразвукового сканування можна використовувати для різних застосувань, таких як картографія, неруйнівний контроль, медична візуалізація та робототехніка. Деякі приклади датчиків для ультразвукового сканування:



Рисунок 1.3 – Ультразвуковий датчик HC-SR04

- а) ультразвукові датчики HC-SR04 (рис. 1.3) є недорогими та простими у використанні датчиками, які використовують один елемент як для випромінювання, так і для прийому. Вони можуть вимірювати відстані до 4 метрів з точністю до 3 мм [1];

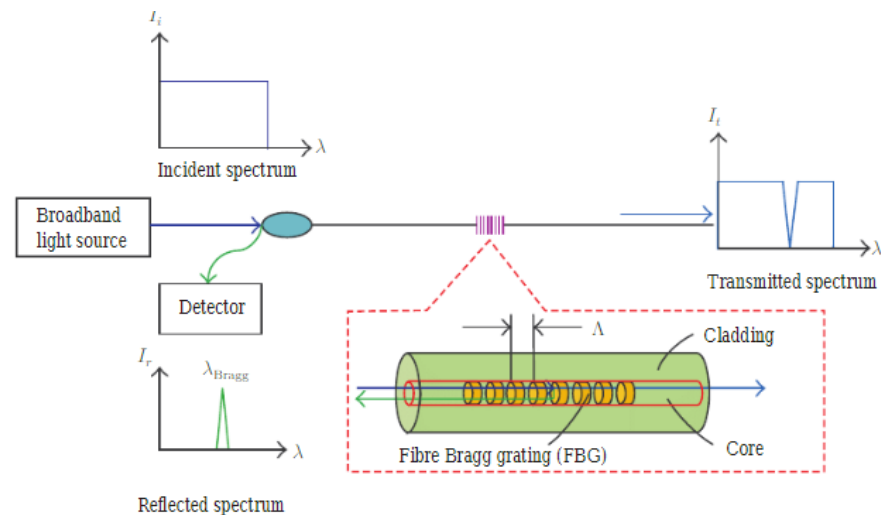


Рисунок 1.4 – Датчик з волоконною ґраткою Брегга (FBG)

- б) датчики з волоконною ґраткою Брегга (FBG) (рис. 1.4) — оптоволоконними датчиками, які використовують світлові хвилі для вимірювання деформації та температури. Їх можна використовувати для виявлення ультразвукових хвиль шляхом вимірювання змін у довжині хвилі відбиття світла через деформацію, спричинену звуковими хвилями [2];

Бреггівська решітка складається з періодичної зміни показника заломлення ядра. Це реалізується шляхом піддавання серцевини волокна УФ інтерференційній картині. Ефективний показник заломлення серцевини до виготовлення решітки називається n_{eff} . Основна ідея полягає в тому, щоб деформувати решітку, щоб довжина кроку Λ (формула 1) та індекс n_{eff} змінювалися, що призводить до зміни довжини

хвилі Брегга λ_{Bragg} . Довжина хвилі Брегга λ_{Bragg} може бути виражена через:

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}} \Lambda \quad (1)$$

Зміщення довжини хвилі λ_{Bragg} змінюється лінійно як з деформацією, так і з температурою. Коли частина решітки піддається зовнішньому впливу, період решітки буде змінюватися, а довжина хвилі Брегга змінюватиметься відповідно.

Як правило, оптичні волокна являють собою циліндричні кремнеземні хвилеводи, виготовлені з двох концентричних шарів, серцевини та оболонки, які направляють світло завдяки незначній різниці показників заломлення обох матеріалів. Оптичне волоконна сенсорна система складається з передавача світла, приймача, оптичного волокна, елемента модулятора та блоку обробки сигналу. У випадку датчиків FBG корисна інформація міститься в бреггівському зсуві довжини хвилі. Останні можуть бути виміряні різними методами демодуляції. Один з найбільш простих і економічно ефективних полягає в тому, щоб перетворити зсув довжини хвилі на зміну амплітуди за допомогою оптичного волокна. Це так звана техніка крайового фільтра, керована блоком опитування (часто званим запитувачем). Таким чином, вихідний сигнал є напругою, пропорційною деформації вздовж волокна в положенні FBG (датчик деформації). Таким чином, чутливість датчика FBG може бути виражена в $[\text{pm}/\mu\text{m}]$ і залежить від багатьох факторів (таких як геометрія сердечника та матеріал, значення λ_{Bragg} , . . .) [4].

- в) ультразвукові датчики допомоги при паркуванні (PAS), які використовують ультразвукові хвилі для виявлення перешкод навколо автомобіля та допомоги водієві при паркуванні. Зазвичай вони використовують від чотирьох до восьми датчиків, встановлених на передньому та задньому бамперах автомобіля [3].

1.3 Аналіз галузей застосування ультразвукового вимірювання

Одна з галузей де ми можемо використовувати ультразвукове сканування – це - моніторинг стану конструкцій залізничних мереж (рис. 1.5). Звичайні системи моніторингу інфраструктури вже існують (наприклад, лічильники осей, колійні ланцюги), але мають деякі недоліки. Однак використання волоконно-оптичних датчиків, а точніше волоконно-волоконних датчиків Бреґґівської ґратки (FBG), стає реальною альтернативою завдяки їх стійкості до електромагнітних полів і простому мультиплексуванню. Мета застосування датчиків FBG як датчиків вібрації вздовж рейки з метою отримання корисних сигналів, які мають достатній інтерес для зважування в русі та підрахунку осей [4].

Датчики FBG є дуже перспективними датчиками вібрації на залізничному транспорті, оскільки вони мають численні переваги порівняно з традиційними методами, які вже використовувалися [5]. Найважливіша перевага полягає в тому, що вони стійкі до електромагнітного впливу, їх можна сортувати в розширений масив датчиків (квазірозподілених датчиків), які охоплюють дуже велику відстань моніторингу залізниці за допомогою одного єдиного волокна та одного запитувача. Однак це завдання є складним, і необхідно провести глибокий аналіз, перш ніж ми зможемо зробити висновок про систему, яка керуватиме моніторингом залізниці в режимі реального часу та надаватиме надійну та надійну інформацію.

Вимоги до зберігання та обробки даних, безсумнівно, зростуть разом із покращенням обчислювальної потужності. Зараз це звичайна практика, коли великі обсяги необроблених наборів даних збираються в цифровому форматі для незалежної перевірки та майбутнього (відкритого) доступу. Технологія радіолокації вже дозволила нам досліджувати величезні території, які інакше були б недоступні для людей, чи то в межах крижаного покриву, чи на найвіддаленішій арктичній крижині. Обсяг інформації, яку можна витягти з радіолокаційних даних, усе ще знаходиться на стадії зародження, і подальший

прогрес у обробці радіолокаційних сигналів та інтерпретації даних допоможе розкрити більше розуміння зсередини та під льодом.

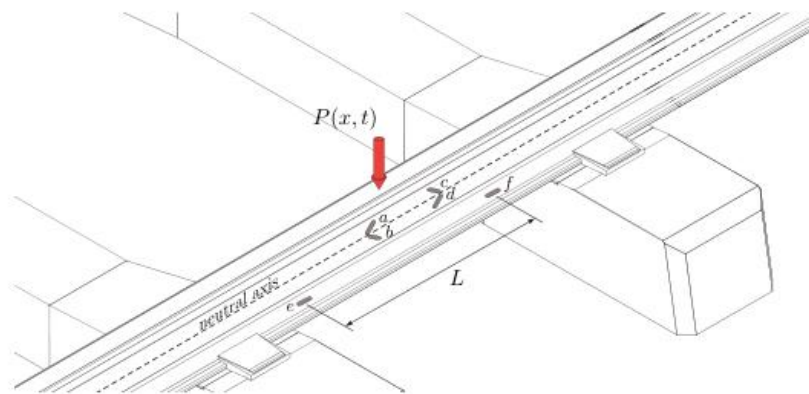
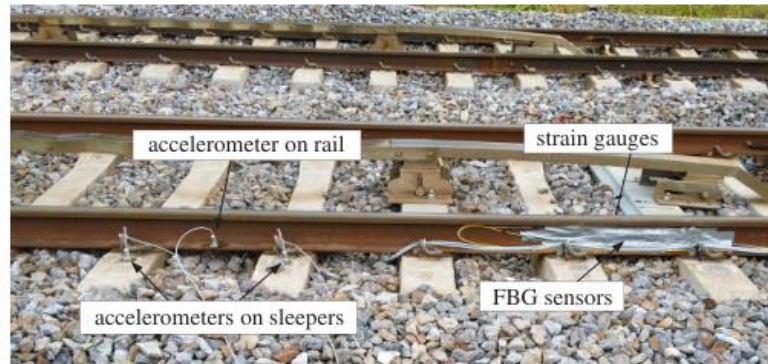


Рисунок 1.5 - Моніторинг стану конструкцій залізничних мереж за допомогою ультразвукового сканування

Радіолокаційні прилади на борту супутників можна використовувати для спостереження за мінливим льодовим покривом Арктики за допомогою супутникової радіолокаційної альтиметрії. Альтиметрія - це техніка, при якій вимірюється висота приладу над цільовою поверхнею. У супутниковій радіолокаційній альтиметрії відстань вимірюється від супутника до поверхні Землі. Тоді висоту поверхні Землі можна обчислити шляхом поєднання вимірювання відстані з точним знанням орбіти супутника. В Арктиці супутникова радіолокаційна альтиметрія використовувалася для вимірювання висоти наземного льоду, океанів і морського льоду. Застосування даних

включає оцінку маси крижаних щитів, циркуляції океану, товщини та об'єму морського льоду.

Порівняно з супутниковими радіолокаційними спостереженнями, вимірювання арктичного снігу та льоду, проведені за допомогою бортових радіолокаційних місій, створюють зображення з набагато вищою просторовою роздільною здатністю, але ціною меншого сліду. Це може бути корисним у дослідженнях в межах окремих льодовикових водозборів, наприклад, для дослідження місцевої топографії та того, як форма рельєфу впливає на потік і деформацію льоду вище. Це ключовий параметр у моделях прогнозування втрати наземного льоду та підвищення рівня моря. Більшість бортових радарів є «бічними», тобто антени розміщені під корпусом або крилами літака та закріплені таким чином, щоб дивитися під прямим кутом до траєкторії літака. Безперервне сканування під час руху літального апарату створює зображення, які перекриваються в просторі, які потім можна зшити разом, щоб створити комбіновану смугу досліджуваної області.

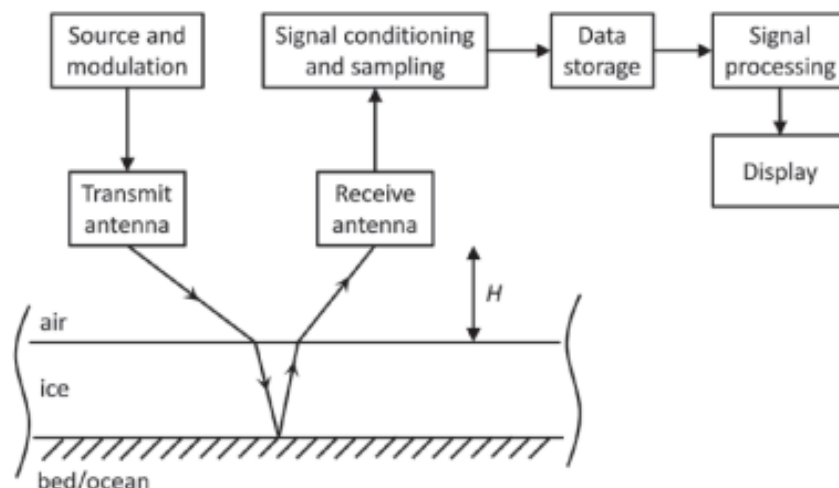


Рисунок 1.6 – Дослідження льодяної поверхні радіолуною

Радіолуна (RES) (рис. 1.6), інша форма радара, функціонує шляхом передачі та прийому електромагнітних хвиль на певних частотах або частотних діапазонах для дослідження властивостей льоду. Поширення радіохвиль через лід в основному контролюється діелектричною проникністю та провідністю матеріалу льоду. Контраст між цими властивостями та іншими

матеріалами, такими як вода та відкладення, призводить до того, що частина радіохвиль, які передаються через лід, відбиваються назад до радіолокаційного приймача на поверхні. Ця затримка та механізм (множинного) відбиття дозволяють неінвазивно спостерігати за основою льоду та шарами всередині маси льоду шляхом відповідної обробки отриманого радіолокаційного сигналу [6].

Ще одна з галузей – це вимірювання дистанції безконтактним методом (рис 1.7). Відстань розраховується на основі часу, необхідного звуковим хвилям, щоб відскочити від об'єкта.

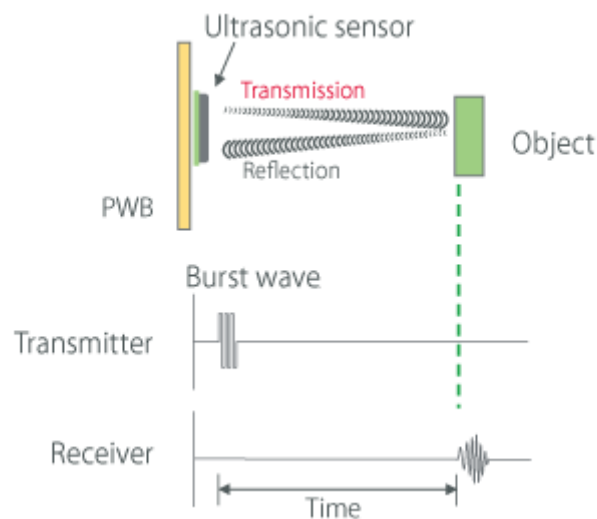


Рисунок 1.7 – Вимірювання відстані до об'єкта за допомогою ультразвукового сканування

Ультразвукові датчики мають багато переваг перед іншими типами датчиків відстані, такими як інфрачервоні чи лазерні. Вони можуть працювати в будь-якому середовищі, незалежно від кольору, форми чи матеріалу об'єкта. Вони також стійкі до навколишнього світла, пилу або вологи. Вони відносно дешеві, прості у використанні. Одним із найпоширеніших застосувань вимірювання дистанції за допомогою датчиків є робототехніка, де їх можна використовувати для уникнення перешкод, навігації та картографування. Наприклад, робот може використовувати ультразвуковий датчик, щоб визначити відстань до стіни та відповідно регулювати свою швидкість або

напрямок. Ще одним прикладом є робот, який може використовувати ультразвуковий датчик для вимірювання висоти столу та розміщення на ньому предмета.

Також має поширення застосування ультразвукових датчиків для промислової автоматизації, де їх можна використовувати для вимірювання рівня, вимірювання витрати та контролю якості. Наприклад, ультразвуковий датчик може вимірювати рівень рідини в резервуарі та надсилати сигнал насосу або клапану для контролю процесу наповнення або спорожнення. Іншим прикладом є ультразвуковий датчик, який може вимірювати товщину або діаметр труби чи дроту та перевіряти, чи відповідає він специфікаціям.

Одним з прикладів використання ультразвукових датчиків у повсякденному житті є сканування для допомоги при паркуванні (рис. 1.8), системи безпеки, пристрої розумного дому та медичне обладнання. Наприклад, ультразвуковий датчик може допомогти водієві припаркувати автомобіль, визначаючи відстань до найближчої перешкоди та видаючи попереджувальний звук або візуальний індикатор.

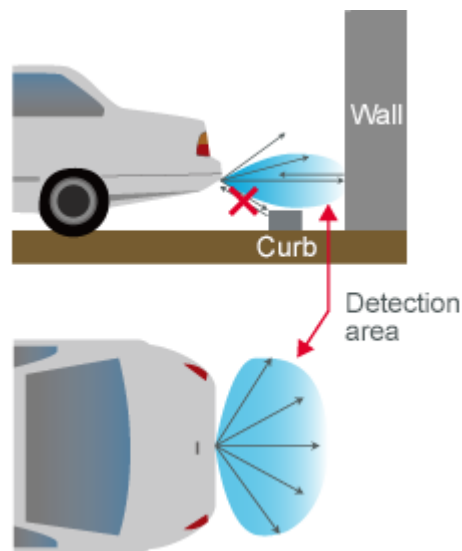


Рисунок 1.8 – Використання ультразвукового сканування для паркування автомобіля

Ще одне побутове застосування – це контроль подачі паперу у принтері. Сканування працює за допомогою двох ультразвукових перетворювачів, по

одному з кожного боку шляху проходження паперу. Перетворювачі випромінюють і приймають звукові хвилі, які поширюються по повітрю та паперу. Коли подається один аркуш паперу, звукові хвилі проходять через нього з невеликим затуханням. Коли подається два або більше аркушів паперу, звукові хвилі блокуються або відбиваються додатковим шаром паперу. Перетворювачі вимірюють різницю в інтенсивності або часі звукових хвиль і надсилають сигнал на принтер, щоб припинити подачу (рис. 1.9).

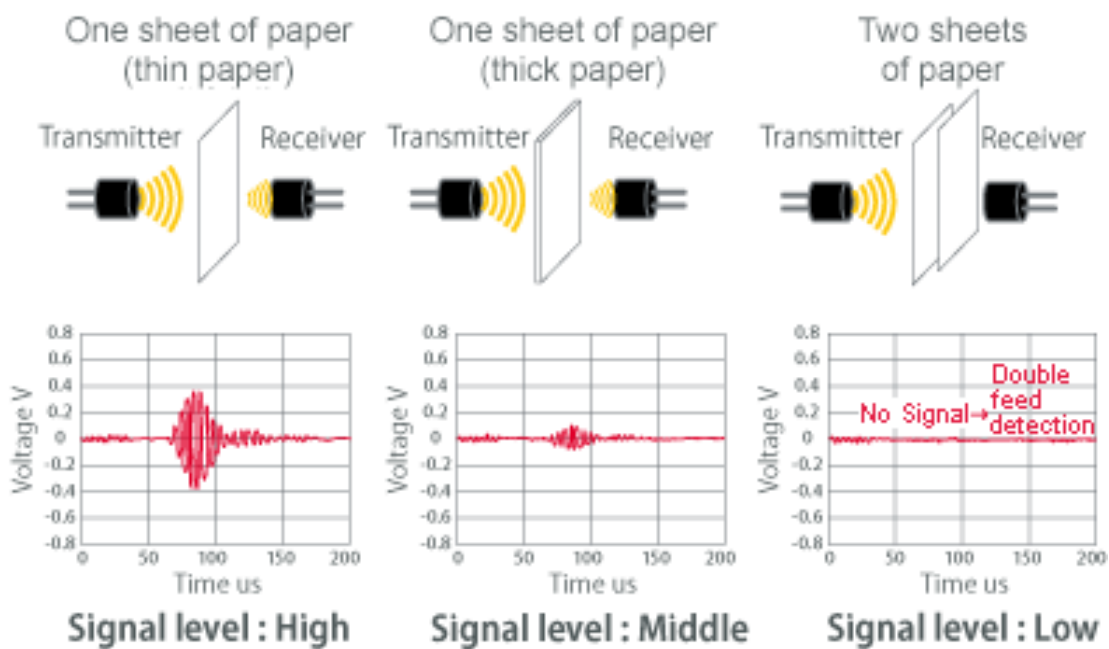


Рисунок 1.9 – Контроль кількості паперу в принтері

Ультразвукове сканування має кілька переваг перед іншими методами виявлення подвійної подачі, такими як оптичний або механічний. Воно може виявити подвійне подавання незалежно від кольору, розміру, форми чи товщини паперу. А також може працювати за будь-яких умов освітлення, без впливу пилу або бруду. Цей тип сканування також є більш надійним і точним, оскільки він може відрізнити подвійну подачу від документа з наклейкою або отвором. Це особливо корисно для сканерів, які обробляють великі обсяги паперу, наприклад в офісах, банках або бібліотеках. У такий спосіб можна підвищити ефективність і якість сканування, оскільки буде зменшено потребу в ручному втручанні, повторному скануванні або корекції зображення.

1.4 Використання системи радарів для спостереження за ціллю

Традиційна мережева радіолокаційна технологія синтезу використовує спосіб обробки сигналу з відкритим контуром, за якого кілька вузлів незалежно спочатку виявляють або відстежують ціль, а потім надсилають свої вихідні дані або оброблені вимірювання в центр керування для оцінки стану цілі. У такий спосіб роботи кожен радіолокаційний датчик працює згідно з попередньо визначеними правилами, приймає фіксований режим передачі та прийому для мінливого середовища відстеження цілі, і, таким чином, безперечно спричинить недостатнє використання свого обмеженого ресурсу. Розподіл ресурсів (РР) став багатообіцяючою технологією більш ефективного використання обмеженого радіолокаційного ресурсу шляхом розподілу доступних параметрів ресурсу на кілька вузлів, які спільно відстежують ціль. В основному існуючі реалізації РР розділяються на два типи, а саме тип РР з обмеженнями відстеження якості та тип РР, керований продуктивністю.

Через обмеження потужності випромінювання, апертури антени та можливостей обробки сигналу, одній радіолокаційній платформі важко задовольнити вимоги для безперервного широкого спостереження та високоточного супроводу цілей. На відміну від єдиної радіолокаційної платформи, яка може отримувати лише обмежену інформацію про ціль, радіолокаційна сенсорна мережа (РСМ) може отримувати достатню інформацію від різних вузлів з різними точками огляду. До теперішнього часу було показано, що РСМ має низку потенційних переваг перед моностатичними радарми [9-19], і тому його можна використовувати для виявлення та супроводу цілей як для військових, так і для цивільних цілей.

Продуктивність супроводу цілі в РСМ визначається точністю моделей руху цілі, якістю вимірювань радарів і геометрією цілі-радару [8]. Якість вимірювань кожного радіолокаційного датчика безпосередньо залежить від його робочого ресурсу, витраченого на цю ціль. Для досягнення вищої якості вимірювань кожен вузол повинен максимально залучати ціль ресурсом. Проте

радары завжди мають обмежений ресурс у практичних застосуваннях. З огляду на вимоги супроводу кількох цілей (СКЦ), ресурс, необхідний для супроводу всіх цілей із заданою продуктивністю, може перевищувати доступність ресурсу кожного радара, і, таким чином, обмеження ресурсу з урахуванням. кожен вузол повинен бути врахований [9-13].

Однак традиційна технологія мережевого радіолокаційного синтезу використовує сегментований спосіб обробки з відкритим циклом, за якого декілька вузлів незалежно виявляють або відстежують спочатку ціль, а потім надсилають необроблені дані або оброблені вимірювання в центр синтезу для мережевого синтезу. Таким чином, будь-яка попередня інформація, отримана з циклу рекурсії відстеження, не повертається з центру злиття до кожного вузла для розподілу ресурсів (РР) [14]. Як наслідок, кілька радіолокаційних датчиків працюють із заздалегідь визначеним робочим режимом, а їх обмежений ресурс розподіляється для кількох цілей без урахування пріоритетної інформації цілей, геометрії та вимог до продуктивності. Таке розташування призведе до недостатнього використання обмеженого радіолокаційного ресурсу. Спосіб узгодженого розподілу обмеженого ресурсу кількох радіолокаційних датчиків для підвищення ефективності використання їх ресурсів має вирішальне значення з огляду на протиріччя між споживанням радіолокаційних ресурсів і вимогами до продуктивності СКЦ [7].

Математично кажучи, СКЦ-орієнтована схема РР для РСМ може бути розроблена як задача оптимізації для досягнення балансу між цільовою продуктивністю відстеження та обмеженим системним ресурсом. Функції оцінки ефективності відстеження, які відповідають різним умовам застосування, можуть бути різними, прагнучи максимізувати ефективність використання ресурсів РСМ.

Вважається, що мережа з N радарів відстежує Q широко розповсюджені незалежні точкові цілі. Кілька радарних датчиків передають сигнали з різними несучими частотами i , таким чином, працюють моностатично. [8]

Ми позначаємо вектор стану цілі q ($q = 1, \dots, Q$) як x_q^k у визначений момент супроводу та припускаємо, що кожен радар i може отримувати незалежне вимірювання $z_{i,q,k}$ цілі q . У цьому сценарії моделі переходу стану та вимірювання можуть бути представлені таким чином [20]:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k^q = \mathbf{f}_q(\mathbf{x}_{k-1}^q) + \mathbf{u}_{k-1}^q \\ \mathbf{z}_{i,q,k} = \mathbf{g}_{i,q,k}(\mathbf{x}_k^q) + \mathbf{w}_{i,q,k} \end{cases} \quad (1)$$

У (1), $f_q(\bullet)$ позначає функцію переходу стану цілі q , u_{k-1}^q є відповідним гаусівським шумом процесу з відомою коваріаційною матрицею Q_{k-1}^q [21]. У другому рівнянні (1), $g_{i,q,k}(\bullet)$ позначає функцію вимірювання цільової величини q відносно радару i [22], $w_{i,q,k}$ є нульовим середнім, похибка вимірювання Гауса $\sum_{i,q,k}$.

На відміну від використання одного радара, об'єднання вимірювань, отриманих від кількох радарних датчиків, може підвищити точність оцінки стану цілей. Протягом багатьох років у цій галузі було виконано ряд досліджень і існуючі методи синтезу можна розділити на дві категорії: централізовані (злиття вимірювань [23]) і розподілені (злиття треків [24]) методи.

Централізоване відстеження відноситься до режиму роботи, коли кожен радар надсилає необроблені дані або частково оброблені вимірювання в центр синтезу [25]. Оцінки стану цілей отримують за допомогою алгоритмів синтезу, що працюють у центрі синтезу. Зазвичай використовуваними алгоритмами оцінки злиття є фільтр Калмана (ФК) [26], фільтр злиття максимальної правдоподібності [27], фільтр найкращого лінійного незміщеного оцінювання [28], фільтр злиття з випадковим зважуванням [29] тощо.

Фільтр Калмана (рис. 1.11) — це загальний алгоритм, який використовується для оцінки параметрів системи (рис. 1.10). Він може використовувати неточні або шумні вимірювання, щоб оцінити стан цієї змінної або іншої неспостережуваної змінної з більшою точністю. Наприклад, фільтр Калмана використовується для виконання наступних дій:

- 1) відстеження об'єкта – використовується вимірне положення об'єкта, щоб точніше оцінити положення та швидкість цього об'єкта;
- 2) оцінка ваги тіла на цифрових вагах – використовується вимірюваний тиск на поверхні, щоб оцінити вагу об'єкта на цій поверхні;
- 3) наведення, навігація та контроль – використовуються датчики інерціального вимірювального блоку (IMU) для оцінки розташування, швидкості та прискорення об'єктів; і використовуються ці оцінки, щоб контролювати наступні рухи об'єктів.

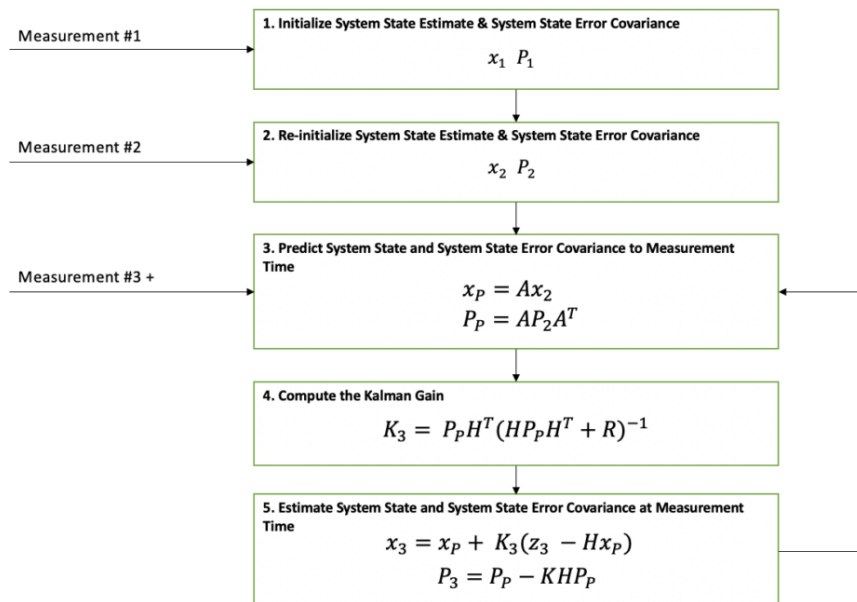


Рисунок 1.10 – Послідовність операцій для алгоритму Калмана

Справжня потужність фільтра Калмана полягає не в згладжуванні вимірювань. Це здатність оцінювати параметри системи, які неможливо виміряти або спостерігати з точністю. Оцінки з підвищеною точністю в системах, які працюють у режимі реального часу, дозволяють системам краще контролювати та, отже, більше можливостей.

Фільтр злиття максимальної правдоподібності — це техніка, яка використовується в багатосенсорному та багатоцільовому спостереженні для вирішення проблеми спільної реєстрації, асоціації та злиття. Це алгоритм

максимізації очікування (EM), який включає розширений фільтр Калмана (ЕКФ) для отримати результати синтезу, тоді як параметри реєстрації оновлюються на M-кроці. Асоціація вимірювань сенсора з цілями також обчислюється як відсутні дані на E-кроку. Основна перевага цього методу порівняно зі звичайними підходами полягає в тому, що взаємні ефекти реєстрації, асоціації та злиття враховуються, коли є задача відстеження з декількома датчиками та декількома цілями. Результати моделювання демонструють, що продуктивність цього методу в термінах середньої квадратичної помилки (MSE) близька до задньої межі Крамера-Рао (PCRB) і краща, ніж один із традиційних підходів, який виконує реєстрацію, асоціацію та злиття окремо.

Фільтр найкращої лінійної неупередженої оцінки (BLUE) — це статистичний метод, який використовується для оцінки невідомого параметра в моделі лінійної регресії. Це неупереджена оцінка, яка має найменшу дисперсію серед усіх неупереджених лінійних оцінок. BLUE фільтр широко використовується в різних галузях, таких як техніка, економіка та фізика.

BLUE фільтр заснований на теоремі Гаусса-Маркова, яка стверджує, що за певних припущень оцінка звичайних найменших квадратів (OLS) є оцінкою BLUE. Оцінка OLS є найбільш часто використовуваною оцінкою в моделях лінійної регресії.

Фільтр BLUE також пов'язаний з фільтром Калмана, який є рекурсивним алгоритмом, який оцінює стан динамічної системи на основі серії вимірювань із шумом. Фільтр Калмана є узагальненням фільтра BLUE і може використовуватися в нелінійних системи також.

Фільтр злиття з випадковим зважуванням — це методологія для оптимального об'єднання багатовимірних даних про місцезнаходження. Він використовується для оцінки даних про місцезнаходження з одного датчика, а потім об'єднує оцінки з кожного окремого датчика для отримання оптимального об'єднання даних про місцезнаходження з кількох датчиків. Метод простий у обчисленні та підходить для великих вибірок. Він не

покладається на знання розподілу параметрів позиції, а результати оцінки є незміщеними. Метод використовувався для вирішення різних проблем і має багато переваг перед існуючими методами об'єднання даних, такими як широко використовуваний фільтр Калмана (рис. 1.11).

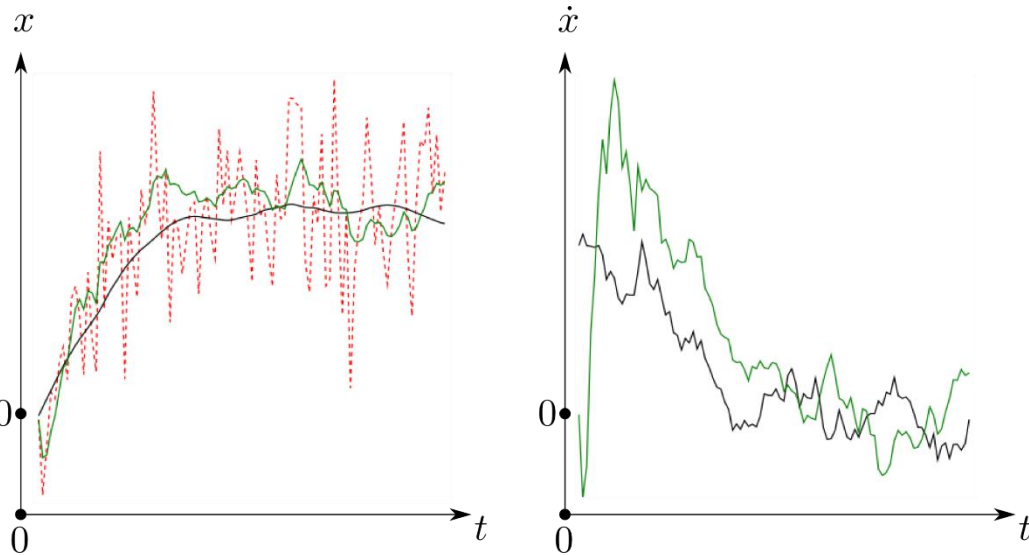


Рисунок 1.11 – Приклад використання алгоритму Калмана. Чорна лінія – реальний показник, зелена – фільтровані значення, червона – показники датчиків

Оцінка ефективності відстеження цілі важлива не тільки для порівняння та подальшого розвитку алгоритмів, але й для побудови прийнятних моделей РР. Загалом, використовуються такі показники для оцінки продуктивності трекара, як:

а) Час підтвердження цілі [30]. У процедурі злитого відстеження кожен радарний датчик генерує впорядковану за часом послідовність вимірювань. Потім алгоритм відстеження послідовно обробляє вимірювання. Оскільки час освітлення різний для різних датчиків для однієї цілі, підтвердження цілі буде коштувати часу;

б) Швидкість помилкових треків [31]. Кожен радіолокаційний датчик генерує набір вимірювань із заданою частотою помилкових тривог. Після

асоціації даних деякі з помилкових тривог сформулюють потенційні запуски примарних слідів;

в) Фрагменти колії [32]. Через коливання RCS ціль може змінити свій статус із відстежуваного на невідстежуваний. Кількість фрагментів треків підраховує, скільки разів наземна істинна траєкторія переривається;

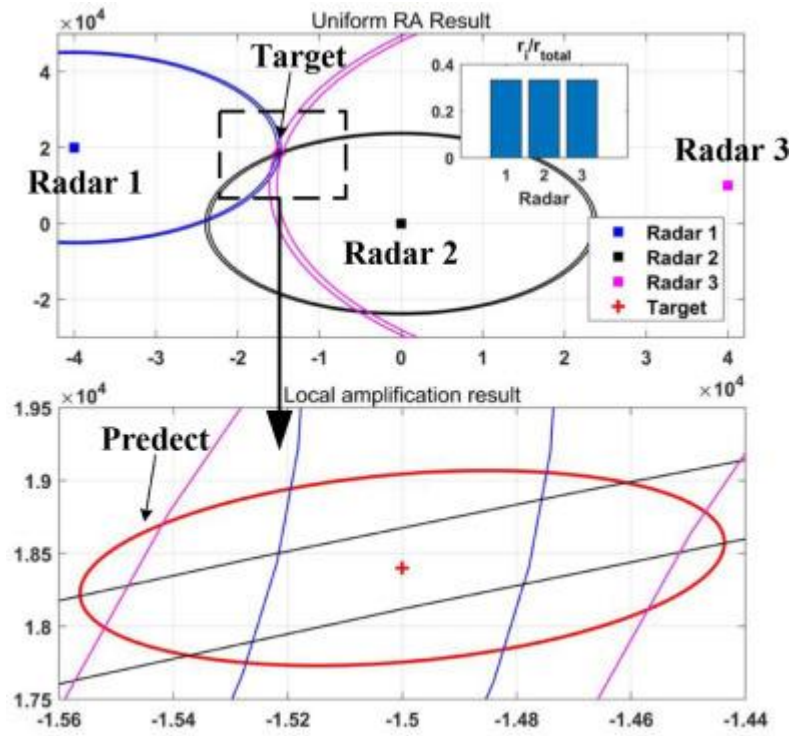
г) Помилка позиції відстеження [33]. Евклідова відстань між розрахунковим розташуванням цілі та реальним місцем цілі;

г) Очікувана кількість треків. Підрахувати кількість цілей, які можна задовільно відстежувати;

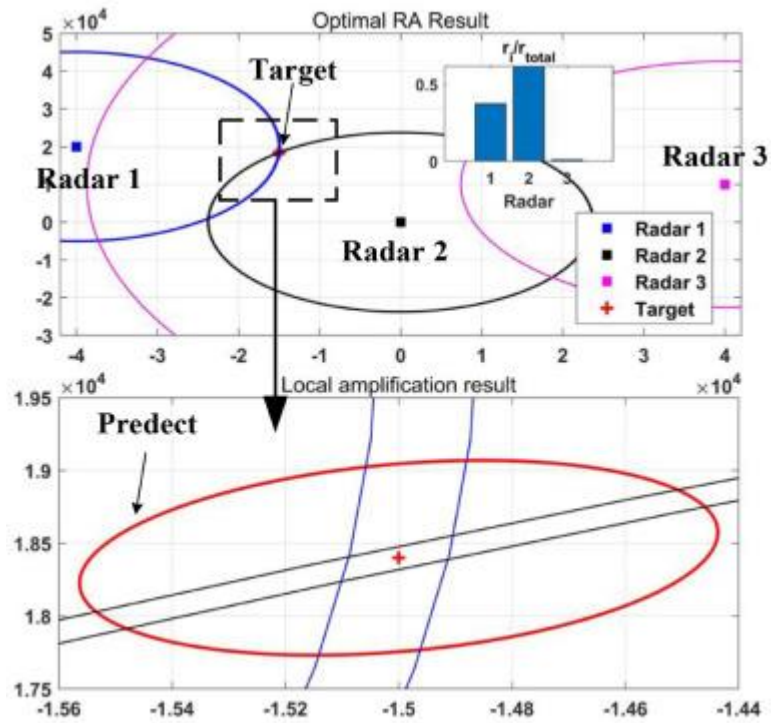
д) Відстань оптимального призначення підшаблону (OSPA) [34]. Метрика OSPA визначена для методів на основі випадкової кінцевої множини, вона враховує як помилку кардинальності, так і помилку позиції в просторі станів. Загалом, вищезазначені показники забезпечують різні показники ефективності з різних точок зору.

Ефективність відстеження цілі в РСМ безпосередньо пов'язана з якістю вимірювань радарів, а також ресурсом їх передачі, витраченим на цю ціль. На рис. 1.12 ми бачимо один приклад РР передачі, який ілюструє фізичну інтерпретацію потенційних переваг стратегії РР. На рис. 1.12 (а) і рис. 1.12 (б) три радари споживають однакову кількість ресурсу передачі. На рис. 1.12 (а) загальний ресурс передачі рівномірно розподіляється між трьома радарями, тоді як на рис. 1.12 (б) ресурс передачі оптимально розподіляється за допомогою відповідної моделі РР.

На рис. 1.12 похибки визначення дальності різних радарів позначені кількома кружками різного кольору. Червоний еліпс характеризує прогнозовану інформацію про трек цілі, а його розмір пов'язаний з моделлю руху цілі. У такому випадку зона перетину еліпса з кількома концентричними колами вказує на точність супроводу цілі. Оскільки розміром кіл можна керувати, регулюючи ресурс передачі, ми бачимо, що точність відстеження цілі можна оптимізувати за допомогою належного РР. Результати на рис. 1.12 показують, що обмежений ресурс, як правило, виділяється радару 1 і радару 2,



(a) Schematic diagram of uniform RA result



(b) Schematic diagram of optimal RA result

Рисунок 1.12 – Приклад РР передачі [31]

які можуть зменшити зону перетину, а це означає, що крок РР може підвищити ефективність використання ресурсу, використовуючи просторове розмаїття. кілька радарних датчиків для кращої точності відстеження цілей.

Для кожної цілі q потрібен набір ресурсних параметрів із кількості N радарних датчиків, які можна визначити як (2):

$$\mathbf{s}_q = [\mathbf{s}_{1,q}^T, \mathbf{s}_{2,q}^T, \dots, \mathbf{s}_{N,q}^T]^T. \quad (2)$$

Зокрема, кожен радіолокаційний датчик i обробляє унікальний вектор $s_{i,q}$ керування ресурсом для цілі q , який містить різні типи адаптованих параметрів ресурсу з урахуванням на цю ціль. Як показано на рис. 1.13, $s_{i,q}$ може складатися з параметрів ресурсу передачі [35-36], параметрів ресурсу маневрування [37], а також параметрів ресурсу прийому.

Фізично кажучи, вибір параметрів ресурсу для радіолокаційного датчика впливає на його споживання ресурсів. Обсяг ресурсів, необхідних радару i для відстеження цілі q , можна представити як $r_{i,q} = g_{i,q}(s_{i,q})$, де $g_{i,q}(s_{i,q})$ є функція відображення ресурсу. Для параметрів передачі, таких як потужність передачі, час перебування тощо, функція відображення ресурсу $g_{i,q}(s_{i,q})$ є лінійною функцією. Тоді як для інших параметрів, таких як час повторного відвідування, $g_{i,q}(s_{i,q})$ є нелінійним, оскільки потрібно перетворити параметр часу повторного відвідування в кількість повторних відвідувань, а потім зіставити його з простором часового ресурсу. За допомогою нотації ресурсу s_q кожна ціль можна відслідковувати з конкретною продуктивністю $B_q(s_q)$. Різні типи ресурсів мають власні обмеження, але об'єднані у функції відстеження продуктивності.

Для отримання РР в РСМ існує кілька проблем вибору датчиків, де підмножина доступних датчиків вибирається для гарантованої точності відстеження. Параметри ресурсів передачі та прийому спільно оптимізовані відповідно до різних вимог продуктивності. Щоб задовольнити наведені вимоги відстеження, використовується структура глибокого навчання для побудови спільної схеми вибору радара та розподілу потужності. Щоб

мінімізувати загальне енергоспоживання для кращої продуктивності LPI, пропонується стратегія PP шляхом спільної оптимізації вибору радіолокаційного вузла, потужності передачі та розподілу смуги пропускання сигналу.

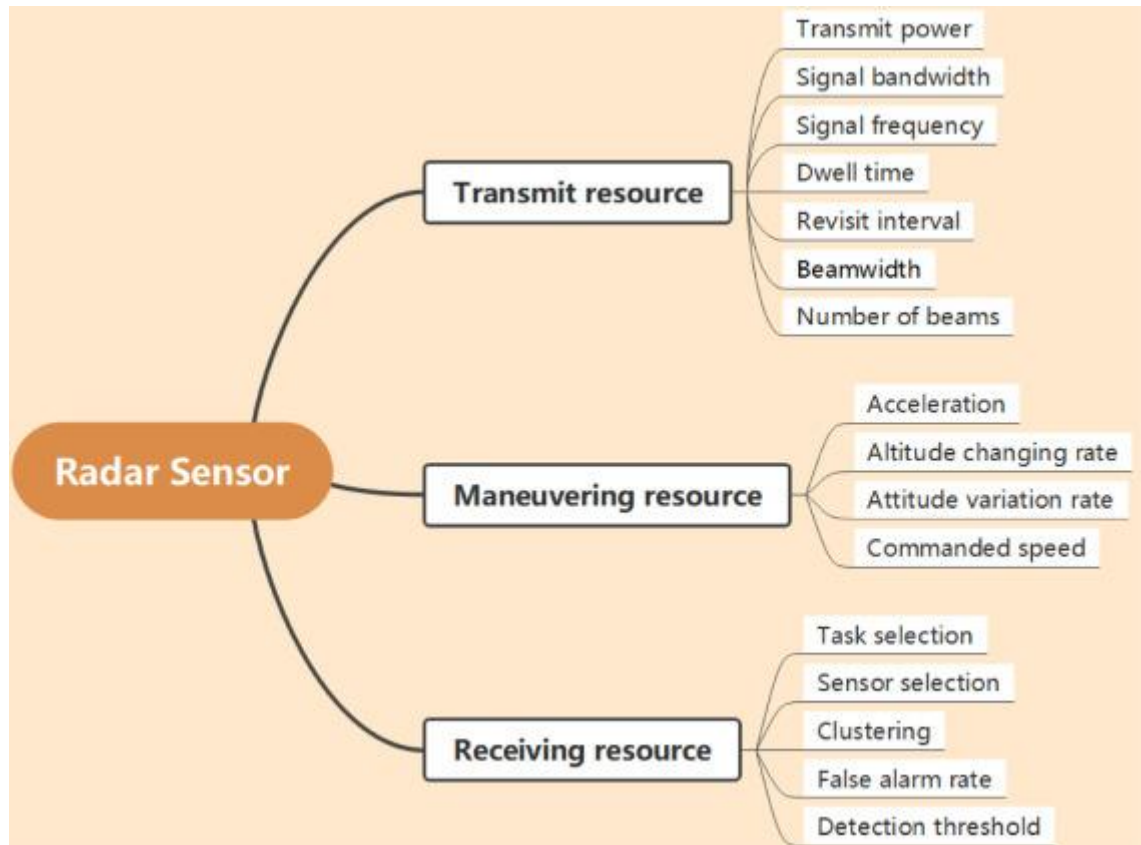


Рисунок 1.13 – Графік доступних ресурсів радару

1.5 Аналіз наявних архітектур мікроконтролерів

Архітектури процесорів — це фундаментальні конструкції, які визначають, як процесор працює та взаємодіє з іншими компонентами. Вони впливають на продуктивність, ефективність, сумісність і гнучкість процесора, а також мають тривалий вплив на розробку програмного забезпечення та інновації в обчислювальній сфері.

Дві архітектури процесорів, які привернули значну увагу в останні роки, це RISC-V і ARM. RISC — це комп'ютерна архітектура, розроблена та

оптимізована для використання меншої кількості інструкцій, ніж аналоги CISC. Ця менша кількість інструкцій та інша технологія оптимізації, яка використовується в архітектурі RISC, дозволяють цим типам процесорів споживати менше енергії, що робить їх ідеальними для смартфонів, камер, розумних годинників і всіх видів пристроїв IoT.

Arm Ltd. — це компанія, яка розробляє та ліцензує чіпи для різних виробників апаратного забезпечення, таких як Apple, MediaTek, Qualcomm і менших компаній, таких як PINE64 (рис. 1.14). Вони використовують власну закриту ARM ISA для розробки високоефективних мікропроцесорів і систем на кристалі (SoC). Усі розробки Arm відомі як процесори Advanced RISC Machine або просто процесори ARM.

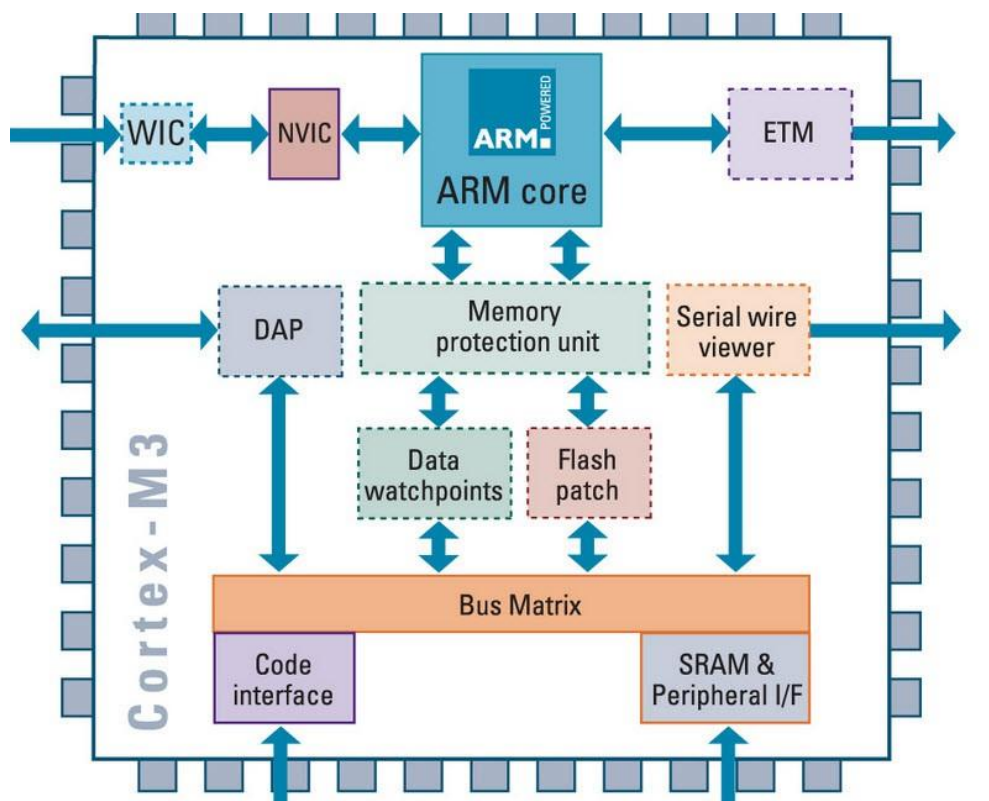


Рисунок 1.14 – Приклад процесора з архітектурою ARM

Подібно до APU AMD, який поєднує центральний і графічний процесори в одному кристалі, процесори ARM, як відомо, поєднують центральний процесор, графічний процесор, пам'ять, DSP і різні модеми в

одному кристалі або мікросхемі — це називається системою на кристалі (SoC). Ця тісна інтеграція кількох модулів дозволила процесорам ARM бути швидкими та ефективними.

RISC-V — це ISA з відкритим стандартом, розроблена в Каліфорнійському університеті в Берклі (рис. 1.15). Цей ISA не представляє жодної нової технології на ринку, але багато хто припускає, що це майбутнє процесорів на основі RISC.

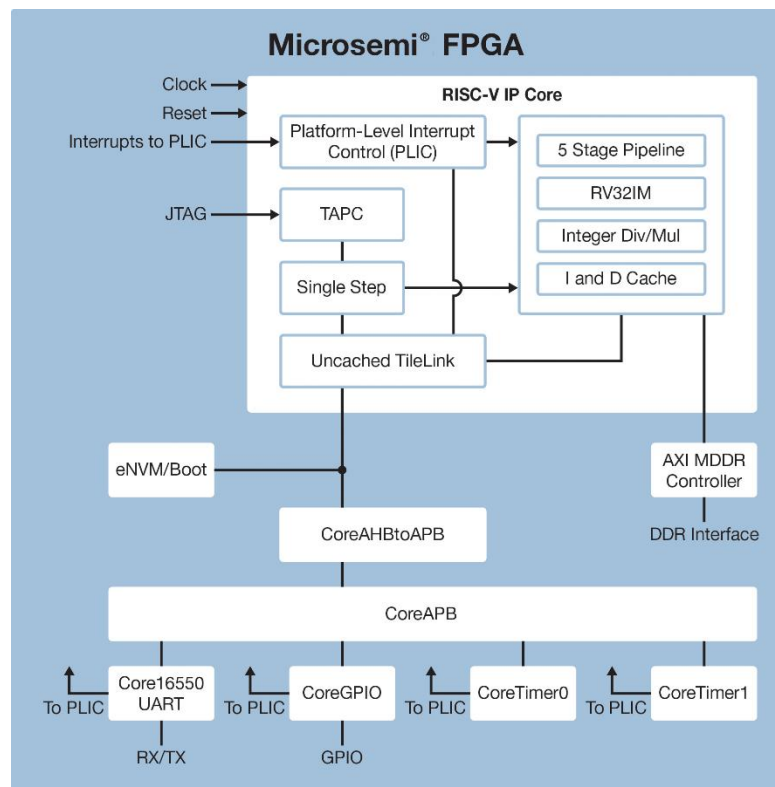


Рисунок 1.15 – Приклад процесора на основі архітектури RISC-V

RISC-V і ARM мають деякі подібності та відмінності в своїх архітектурних особливостях і варіантах дизайну, які впливають на їх продуктивність, ефективність, сумісність і гнучкість. Оглянемо деякі з цих особливостей.

Набір інструкцій - це набір команд, які процесор може зрозуміти та виконати. Він визначає функціональність і можливості процесора, а також інтерфейс між апаратним і програмним забезпеченням.

RISC-V і ARM дотримуються принципів RISC, які віддають перевагу невеликому й уніфікованому набору інструкцій, які можуть швидко й ефективно виконуватися процесором. Однак RISC-V і ARM відрізняються розміром, структурою та організацією своїх наборів інструкцій.

RISC-V має мінімальний і модульний набір інструкцій, що складається з базової ISA і кількох додаткових розширень. Базовий ISA ділиться на два підмножини: RV32I і RV64I, які підтримують 32-розрядний і 64-розрядний адресний простір відповідно. Розширення позначаються літерами, наприклад М для множення та ділення, А для атомарних операцій, F для одинарної точності з плаваючою комою, D для подвійної точності з плаваючою комою, С для стиснутих інструкцій тощо. RISC-V також дозволяє використовувати власні розширення, які можна адаптувати до конкретних потреб і програм.

ARM має складний і вичерпний набір інструкцій, що складається з кількох варіантів і версій. Основними варіантами є ARM і Thumb, які підтримують 32-розрядні інструкції, і ARMv8, який підтримує як 32-розрядні, так і 64-розрядні інструкції. Версії позначаються цифрами, як-от ARMv7, ARMv8-A, ARMv8-R і ARMv8-M, які вказують на функції та вдосконалення кожної версії. ARM також надає деякі додаткові розширення, такі як NEON для операцій SIMD, VFP для операцій з плаваючою комою та Jazelle для виконання байт-коду Java.

Набір інструкцій RISC-V і ARM впливає на їх продуктивність, ефективність, сумісність і гнучкість. RISC-V має перевагу простоти та модульності, що полегшує розуміння, впровадження та оптимізацію. RISC-V також має перевагу можливості налаштування, що дозволяє адаптувати його до різних потреб і програм. Однак RISC-V має недолік фрагментації та сумісності, що може призвести до непослідовності та несумісності між різними реалізаціями та розширеннями RISC-V. RISC-V також має недолік незрілості та незавершеності, що може обмежити його функціональність і можливості порівняно з іншими архітектурами.

ARM має перевагу повноти та комплексності, що робить його здатним підтримувати широкий спектр функцій і програм. Також ця архітектура має перевагу узгодженості та сумісності, що забезпечує уніфікований і узгоджений ISA для різних варіантів і версій ARM. Однак існує недолік складності та жорсткості, що ускладнює розуміння, впровадження та оптимізацію. ARM також має недолік дороговизни, що обмежує її гнучкість і можливість налаштування порівняно з іншими архітектурами.

Регістри — це невеликі та швидкі блоки пам'яті, які зберігають дані та інформацію, що використовуються процесором. Вони важливі для продуктивності та ефективності процесора, оскільки зменшують потребу в доступі до повільнішої та більшої основної пам'яті.

RISC-V і ARM мають великий і уніфікований набір реєстрів, що дозволяє їм виконувати більше операцій і обчислень без доступу до основної пам'яті. Однак RISC-V і ARM відрізняються кількістю, розміром і організацією своїх реєстрів.

RISC-V має 32 реєстри, кожен з яких має ширину 32 або 64 біти, залежно від адресного простору. Регістри мають нумерацію від $x0$ до $x31$, і вони є універсальними, тобто їх можна використовувати для будь-яких даних або інформації. Однак деякі реєстри мають спеціальні функції або домовленості, наприклад $x0$, який завжди містить нульове значення, $x1$, який використовується як адреса повернення для викликів функцій, $x2$, який використовується як вказівник на стек, $x3$, який використовується як глобальний покажчик.

ARM має 16 реєстрів, кожен з яких має ширину 32 біти, або 31 реєстр, кожен з яких має ширину 64 біти, залежно від адресного простору. Регістри мають назви від $r0$ до $r15$ або від $x0$ до $x30$, і вони також є універсальними, але деякі реєстри мають спеціальні функції чи умовності, наприклад $r15$ або $x30$, який використовується як програмний лічильник, $r14$ або $x29$, який використовується як реєстр посилань, $r13$ або $x28$, який використовується як

вказівник стека, r12 або x27, який використовується як скретч-реєстр внутрішнього виклику процедури, і так далі.

Регістри RISC-V і ARM впливають на їх продуктивність і ефективність. Перевагою RISC-V є наявність більшої кількості регістрів, що дозволяє зберігати більше даних та інформації в процесорі, зменшуючи потребу в доступі до пам'яті. В свою чергу RISC-V має перевагу в тому, що має ширші регістри, що дозволяє обробляти більші дані та інформацію за одну операцію, підвищуючи швидкість обчислень. Однак RISC-V має недолік у тому, що він має більший тиск на регістри.

Оскільки розробники та виробники всіх типів і розмірів продовжують використовувати RISC-V, програмне забезпечення, апаратне забезпечення та процесори, створені для цієї ISA з відкритим вихідним кодом, зростатимуть. RISC-V стане повсюдним і, за прогнозами, прокладе «шлях до наступних 50 років комп'ютерного дизайну та інновацій».

Перевірений характер RISC-V з відкритим вихідним кодом має вирішальне значення, оскільки він дозволяє невеликим розробникам і виробникам проектувати та створювати апаратне забезпечення без витрат на ліцензування пропрієтарних ISA та виплати роялті. У результаті компанії будь-якого розміру можуть впроваджувати інновації та створювати, випускаючи на ринок найкращі продукти для розвитку галузі та користі для споживачів. [38]

1.6 Аналіз наявних мікроконтролерів

Одним із мікроконтролерів з архітектурою RISC є NodeMCU (рис. 1.16). NodeMCU поєднує в собі переваги звичайного мікроконтролера з платою підключення WiFi і надає весь пакет як єдину плату, яка офіційно називається NodeMCU DevKit. Він має систему на чіпі на основі ESP8266 і розроблений для електроніки та проектів IoT. NodeMCU має широку підтримку, величезну спільноту та безліч бібліотек, які можна використовувати. Одним з головних

факторів є те, що вона дешевша за плату Arduino Uno. Також це рішення виграє у технічному плані з конкурентом Arduino. Деякі з порівняльних характеристик представлені у табл. 1.1.

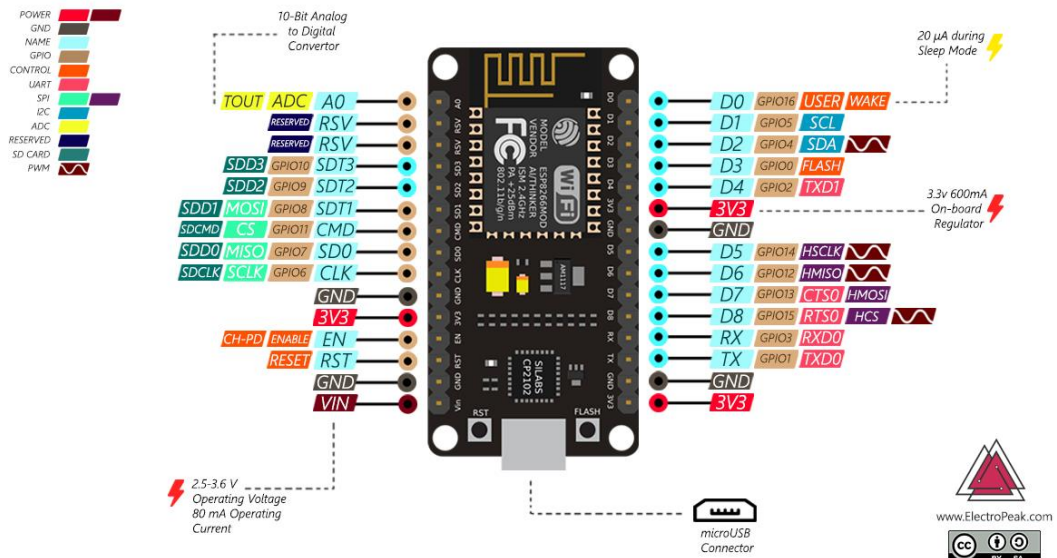


Рисунок 1.16 – Мікроконтролер NodeMCU

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики мікроконтролерів Arduino Uno та NodeMCU

Характеристика	Arduino Uno	NodeMCU
ОЗУ	32 KB	4 MB
Розрядність процесора	8-bit	32-bit
Частота процесора	16 MHz	80 MHz
Бездротові комунікації	-	ESP8266
Підтримувані інтерфейси	UART, I2C, SPI	UART, I2C, SPI
GPIO	10 Digital (5V), 6 Analog (2.5V)	9 Digital (3.3V), 1 Analog (1.8V)
Розміри	6.8 cm × 5.3 cm	4.8 x 2.5 cm

Отже, до переваг NodeMCU відносно Arduino Uno можемо віднести:

а) кращий процесор і пам'ять;

- б) вбудований стек TCP/IP - готовий до IoT;
- в) дешевше;
- г) компактний і зручний для макета.

Також слід сказати про недоліки NodeMCU, яких не так багато в порівнні з перевагами:

- а) менше контактів GPIO;
- б) нижчий рівень напруги - у рідкісних випадках може бути несумісним з іншими модулями.

Ще одна велика перевага NodeMCU - це технологія наднизького енергоспоживання. ESP8266EX розроблено для мобільної електроніки та додатків IoT з метою досягнення найнижчого енергоспоживання за допомогою комбінації кількох власних технологій. Архітектура енергозбереження працює в основному в 3 режимах: активний режим, режим сну та режим глибокого сну. Завдяки використанню вдосконалених методів керування живленням і логіки для непотрібних функцій відключення живлення та для керування перемиканням між сплячим і активним режимами, ESP8266EX споживає приблизно 60 мкА в режимі глибокого сну (з часами RTC, які все ще працюють) і менше 1,0 мА (DTIM=3) або менше 0,5 мА (DTIM=10), щоб залишатися підключеним до точки доступу. У режимі сну активними залишаються лише відкалібрований годинник реального часу та сторожовий таймер. Годинник реального часу можна запрограмувати для виведення ESP8266EX з будь-якого необхідного інтервалу. ESP8266EX можна запрограмувати на вихід із режиму сну при виявленні певної умови. Ця функція мінімального часу пробудження ESP8266EX може використовуватися мобільними пристроями SOC, дозволяючи їм залишатися в режимі очікування з низьким енергоспоживанням, доки не знадобиться Wi-Fi. Щоб задовольнити потребу в електроенергії для мобільної та переносної електроніки, ESP8266EX можна запрограмувати на зменшення вихідної потужності PA відповідно до різних профілів додатків шляхом заміни діапазону на енергоспоживання.

Наведене нижче (табл. 1.2) споживання струму базується на напрузі живлення 3,3 В і температурі навколишнього середовища 25 °С із використанням внутрішніх регуляторів. Вимірювання проводяться на порту антени без SAW-фільтра. Усі вимірювання передавача базуються на 90% робочому циклі, безперервному режимі передачі.

Таблиця 1.2 – Споживання струму NodeMCU

Параметр	Значення, мА
Tx802.11b, CCK 11Mbps, P OUT=+17dBm	170
Tx 802.11g, OFDM 54Mbps, P OUT =+15dBm	140
Tx 802.11n, MCS7, P OUT =+13dBm	120
Rx 802.11b, 1024 bytes packet length , -80dBm	50
Rx 802.11g, 1024 bytes packet length, -70dBm	56
Rx 802.11n, 1024 bytes packet length, -65dBm	56
Modem-Sleep	15
Light-Sleep	0.9
Deep-Sleep	10
Power Off	0.5

Чіп можна перевести в такі стани (рис. 1.17):

а) OFF: на виводі CHIP_PD низький рівень. RTC вимкнено. Усі реєстри очищені,

б) DEEP_SLEEP: увімкнено лише час реального часу – решта мікросхеми вимкнено. Пам'ять відновлення RTC може зберігати основну інформацію про з'єднання WiFi,

в) SLEEP: працює лише RTC. Кристалічний генератор вимкнено. Будь-які події пробудження (MAC, хост, таймер RTC, зовнішні переривання) переведуть мікросхему в стан WAKEUP,

г) WAKEUP: У цьому стані система переходить зі стану сну в стан PWR. Кристалічний генератор і PLL увімкнено,

д) ON: високошвидкісний годинник працює та надсилається до кожного блоку, активованого регістром керування годинником. Стробування тактового сигналу нижчого рівня реалізовано на рівні блоку, включаючи ЦП, який можна вимкнути за допомогою інструкції WAITI, коли система ввімкнена.

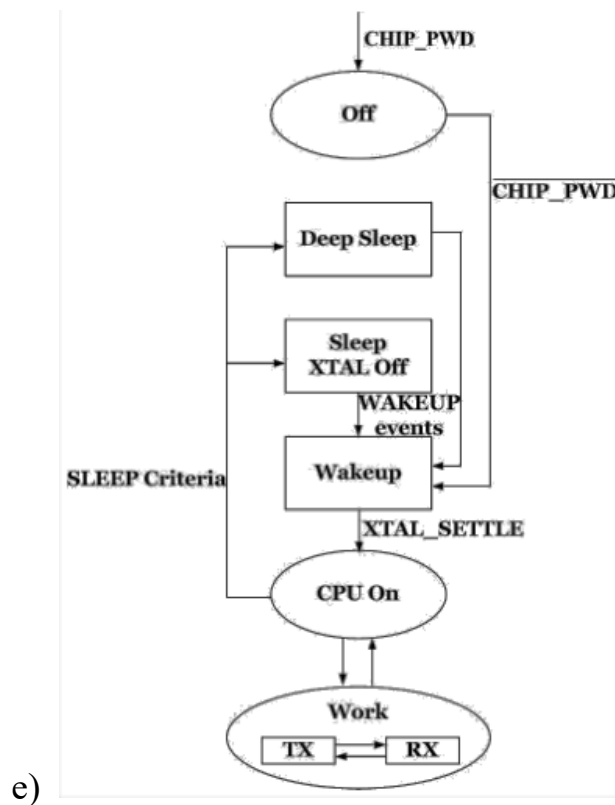


Рисунок 1.17 – Структура менеджменту живлення

Основні інтерфейси які використовує плата, це: UART, I2C, SPI, розглянемо їх більш детально.

UART (рис. 1.18) розшифровується як універсальний асинхронний приймач/передавач. Це апаратний пристрій, який забезпечує послідовний зв'язок між двома пристроями. Послідовний зв'язок означає, що дані передаються побітово по одному проводу або каналу. UART має наступні функції та характеристики:

а) асинхронний: він не використовує сигнал синхронізації для синхронізації передачі та отримання даних. Замість цього він використовує початкові та стопові біти для позначення початку та кінця кожного кадру даних;

б) універсальний: він може працювати з різними форматами даних і швидкостями передачі, які налаштовуються користувачем;

в) частка даних: складається з початкового біта, за яким йдуть від 5 до 9 бітів даних, додаткового біта парності та одного або двох стоп-бітів. Біти даних можуть надсилатися або в першому порядку молодшого значущого біта (LSB), або у старшому бітовому (MSB) першого порядку;

г) швидкість передачі: визначає, скільки бітів можна передати або отримати за секунду. Для успішного зв'язку швидкість передачі даних має бути однаковою як для передавача, так і для приймача. Загальна швидкість передачі даних становить 9600, 19200, 57600 і 115200 біт на секунду,

д) біт парності: це додатковий біт, який використовується для виявлення помилок. Він може бути парним або непарним, тобто кількість одиниць у кадрі даних плюс біт парності має бути парним або непарним відповідно. Якщо біт парності не використовується, це називається без паритету або відсутнім;

е) контроль потоку: це механізм, який дозволяє передавачу та приймачу контролювати потік даних і запобігати переповненню або недоповненню буфера. Він може бути апаратним або програмним. Апаратне керування потоком використовує додаткові дроти для надсилання сигналів між пристроями, наприклад RTS (запит на надсилання) і CTS (зрозуміло на надсилання). Керування програмним потоком використовує спеціальні символи, такі як XON (передавання ввімкнено) та XOFF (передавання вимкнено), щоб призупинити та відновити передачу даних.

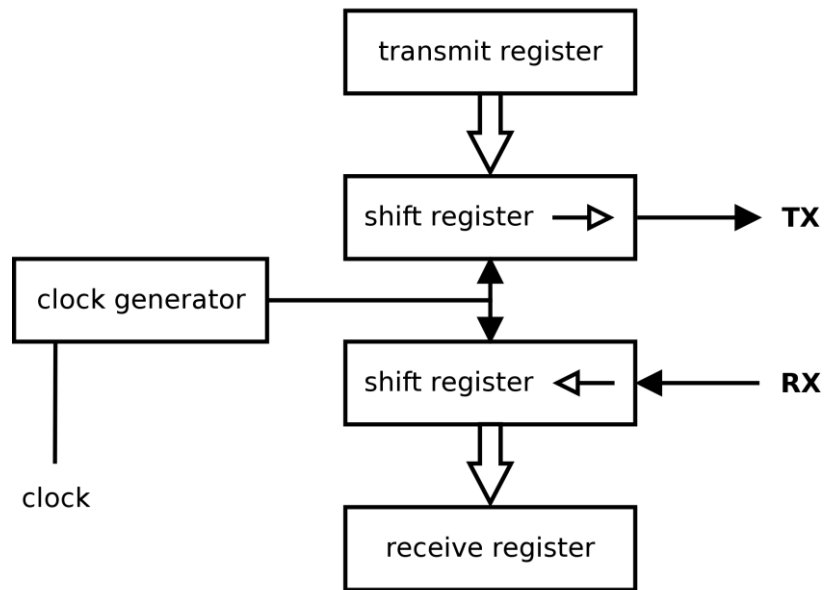


Рисунок 1.18 – Блок схема принципу роботи інтерфейсу UART

UART зазвичай використовується для підключення мікроконтролерів, комп'ютерів, модемів, датчиків та інших послідовних пристроїв. Він може підтримувати симплексний (односторонній), напівдуплексний (поперемінний) або повнодуплексний (двосторонній) режими зв'язку [39].

I2C це синхронна, багатопровідна, одностороння послідовна комунікаційна шина з комутацією пакетів, винайдена компанією Philips Semiconductors у 1982. Деякі функції та специфікації I2C:

а) синхронний: він використовує тактовий сигнал (SCL) для синхронізації передачі та прийому даних між головним і підлеглим пристроями. Тактовий сигнал завжди контролюється майстром;

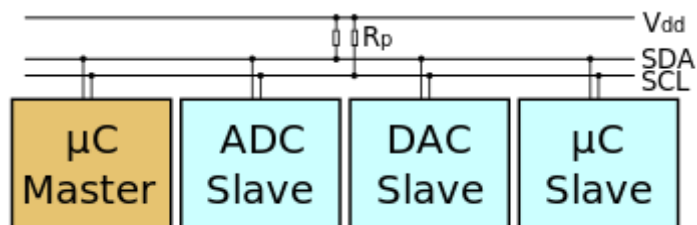


Рисунок 1.19 – Приклад шини I2C

б) «Multi-master/multi-slave» (рис. 1.19): дозволяє декільком пристроям використовувати одну шину та спілкуватися один з одним. Кожен

пристрій має унікальну адресу, яка використовується для його ідентифікації на шині. Ведучий пристрій ініціює та припиняє зв'язок, тоді як підлеглий пристрій відповідає на запити головного;

в) пакетна комутація: передає дані в пакетах або кадрах, які складаються з початкового біта, байта адреси, одного або кількох байтів даних, додаткового біта підтвердження та стоп-біта. Байт адреси визначає пристрій призначення та напрямок читання/запису. Байти даних містять фактичну інформацію для передачі. Біт підтвердження показує, чи успішно пристрій отримав попередній байт. Стоп-біт позначає кінець зв'язку;

г) односторонній: він використовує лише два дроти (SDA та SCL) для даних та тактових сигналів відповідно. Дроти підтягуються резисторами до позитивного рівня напруги та знижуються драйверами з відкритим стоком або відкритим колектором на пристроях. Це дозволяє кільком пристроям використовувати одні й ті самі дроти без короткого замикання;

д) послідовний: передає дані побітово через лінію SDA. Біти даних можуть надсилатися або в першому порядку молодшого значущого біта (LSB), або у старшому бітовому (MSB) першого порядку;

е) швидкість: він підтримує різні швидкісні режими, такі як стандартний режим (100 кбіт/с), швидкий режим (400 кбіт/с), швидкий режим плюс (1 Мбіт/с), високошвидкісний режим (3,4 Мбіт/с) і надшвидкісний режим (5 Мбіт/с). Швидкісний режим визначається найповільнішим пристроєм на шині.

I2C зазвичай використовується для підключення низькошвидкісних периферійних пристроїв до мікроконтролерів, процесорів і комп'ютерів. Деякими прикладами пристроїв I2C є датчики, РК-дисплеї, EEPROM, RTC, АЦП, ЦАП тощо [40].

SPI (рис. 1.20) – це синхронна, повнодуплексна, послідовна шина зв'язку, яка дозволяє одному головному пристрою спілкуватися з декількома підлеглими пристроями.

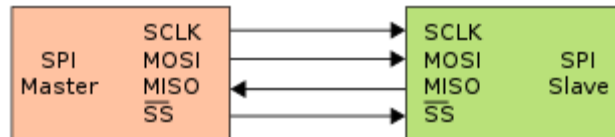


Рисунок 1.20 – Приклад стандартної схеми SPI інтерфейсу

Деякі функції та характеристики SPI:

а) синхронний: він використовує тактовий сигнал (SCK) для синхронізації передачі та прийому даних між головним і підлеглим пристроями. Тактовий сигнал завжди контролюється майстром;

б) повний дуплекс: він використовує дві лінії даних (MOSI та MISO) для одночасної передачі даних в обох напрямках. MOSI означає Master Out Slave In, а MISO означає Master In Slave Out;

в) послідовний: передає дані біт за бітами по лініях даних. Біти даних можуть надсилатися або в першому порядку молодшого значущого біта (LSB), або у старшому бітовому (MSB) першого порядку;

г) вибір мікросхеми: він використовує одну або більше ліній вибору мікросхеми (CS) для вибору підпорядкованого пристрою, з яким провідний хоче спілкуватися. Лінія вибору мікросхеми, як правило, є активним низьким сигналом, що означає, що головний пристрій тягне його на низький рівень, щоб увімкнути підлеглий пристрій. Коли використовується кілька підлеглих пристроїв, для кожного з них потрібна окрема лінія вибору мікросхеми від головного;

д) швидкість: підтримує різні швидкісні режими залежно від тактової частоти та часових характеристик пристроїв. Швидкісний режим визначається найповільнішим пристроєм в автобусі. Типовими режимами швидкості є стандартний режим (до 25 МГц), швидкий режим (до 50 МГц) і високошвидкісний режим (до 100 МГц).

SPI зазвичай використовується для підключення високошвидкісних периферійних пристроїв до мікроконтролерів, процесорів і комп'ютерів.

Деякими прикладами пристроїв SPI є флеш-пам'ять, датчики, рідкокристалічні дисплеї, АЦП, ЦАП тощо [39].

Ще один з поширених мікроконтролерів – це Raspberry Pi. Це одноплатний комп'ютер невеликої вартості, створений здебільше для освітніх цілей. Але зараз він має поширення не тільки для освіти але й використовується у багатьох проектах розумного будинку. Він має власну операційну систему Raspberry Pi OS базовану на Linux, але є можливість встановлення Windows 10 або Windows 10 IoT. Апаратна платформа мікроконтролера - ARM. Головною перевагою цього пристрою є ціна, базова модель коштує всього 4\$ (рис. 1.21).

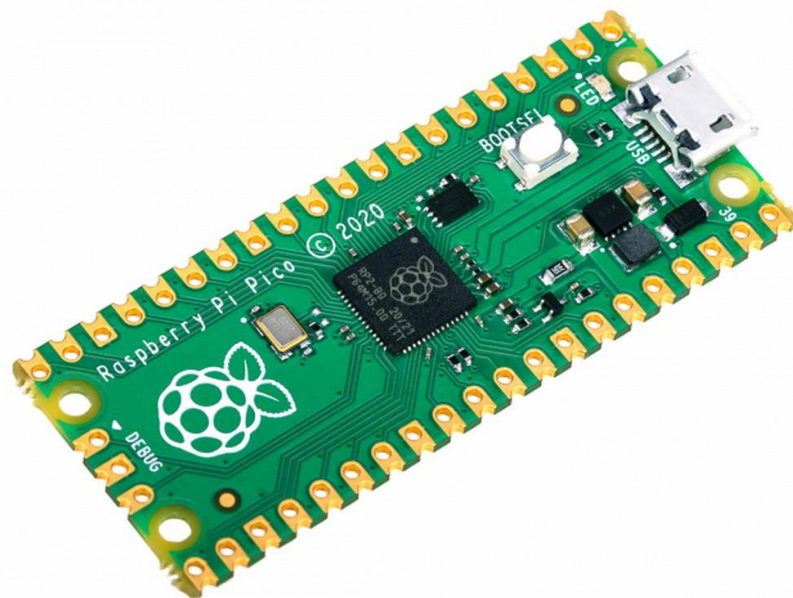


Рисунок 1.21 – Плата Raspberry Pi Pico

Raspberry Pi 4 Model B оснащений високопродуктивним 64-розрядним чотирьох'ядерним процесором, підтримкою двох дисплеїв із роздільною здатністю до 4К через пару портів мікро HDMI, апаратним декодуванням відео до 4Кр60, до 8 ГБ оперативної пам'яті, подвійним діапазоном бездротової локальної мережі 2,4/5,0 ГГц, Bluetooth 5.0, Gigabit Ethernet, USB 3.0 і можливість PoE (через окрему надбудову PoE HAT). Для кінцевого користувача Raspberry Pi 4 Model B забезпечує продуктивність настільного

комп'ютера, порівнянну з ПК x86 початкового рівня. Більш детальні характеристики наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики мікроконтролера Raspberry Pi 4 Model B

Процесор	Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz
Оперативна пам'ять	1GB, 2GB, 4GB or 8GB LPDDR4 (залежить від моделі)
Інтерфейси	2.4 GHz та 5.0 GHz IEEE 802.11b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 5.0, BLE Gigabit Ethernet, 2 × USB 3.0 порти та 2 × USB 2.0 порти.
GPIO порти	Стандартний 40-контактний GPIO роз'єм
Відео/аудіо	2 × мікро HDMI порти (з підтримкою 4Kp60), 2-канальний MIPI DSI порт дисплею, 2-канальний MIPI CSI порт камери 4-полюсний стерео аудіо та композитний відео порти
Мультимедіа	H.265 (4Kp60 декодування); H.264 (1080p60 декодування, 1080p30 кодування); OpenGL ES, 3.0 graphics
Підтримка SD карти	Має слот для SD карти для завантаження операційної системи та збереження даних
Вхідна напруга	5V DC через USB-C порт (мінімум 3A) 5V DC через GPIO роз'єм (мінімум 3A) Живлення через Ethernet (PoE)–увімкнене (потребує окремого PoE HAT)

Мікроконтролер Raspberry Pi розроблявся як виріб з частково відкритим кодом, його електрична схема є у вільному доступі (рис. 1.22).

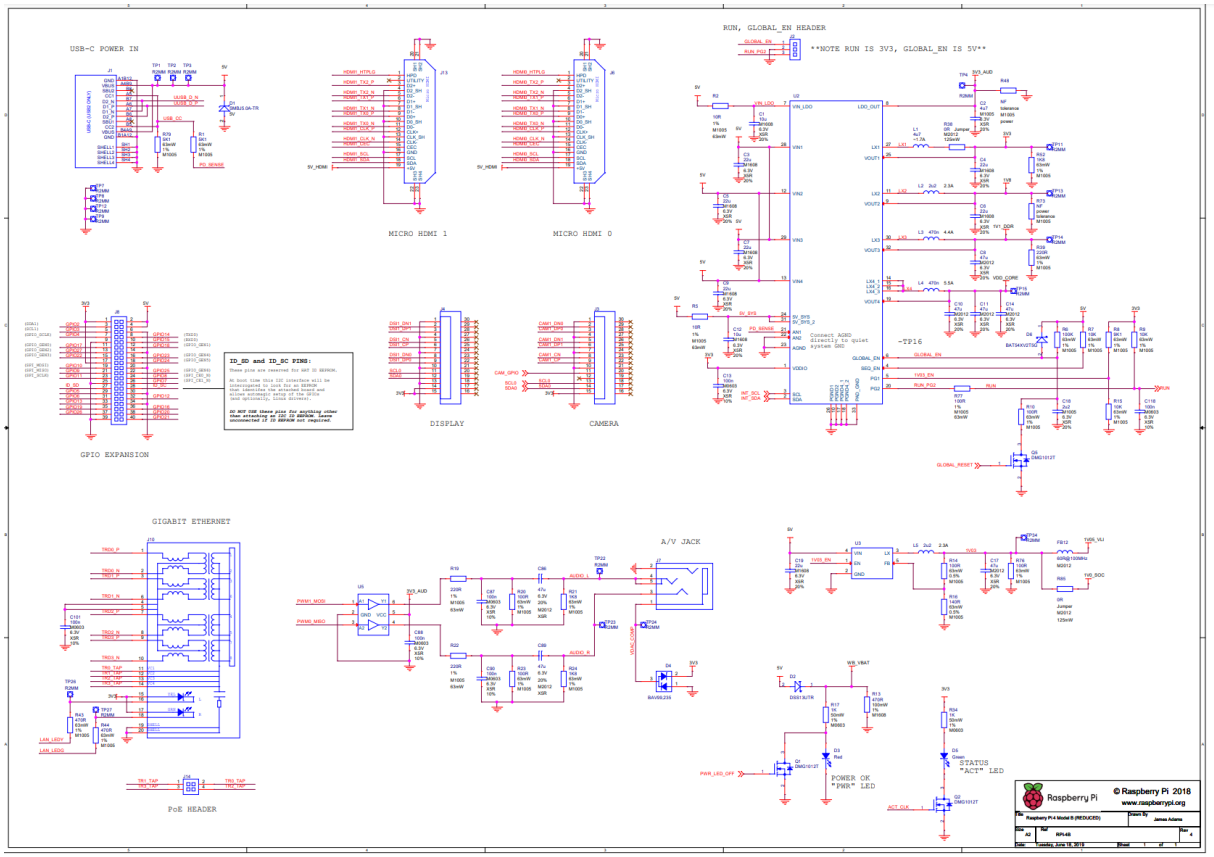


Рисунок 1.22 – Електрична схема мікроконтролера Raspberry Pi

До мінусів цієї платформи можемо віднести частково закритий вихідний код та проблеми з живленням які частково виникають із-за цієї закритості. Якщо подати недостатню напругу на плату, то вона понижує частоту ядра не говорячи нам про це і ми не можемо виправити помилки, бо не бачимо її. Ці операції відбуваються під керівництвом ThreadX OS – внутрішній системі плати з закритим вихідним кодом.

Ще один з варіантів мікроконтролерів – це STM32 (рис. 1.23), він має 32 бітний процесор на базі ARM архітектури. Кожен з контролерів на базі STM32 складається з таких модулів: статична RAM пам'ять, флеш пам'ять, налагоджувального та різноманітних периферійних інтерфейсів.

Мікроконтролер випускається в декількох варіаціях: STM32U5, STM32L5, STM32L4, STM32L4+, STM32L0, STM32F0, STM32G0, STM32F1, STM32F3.

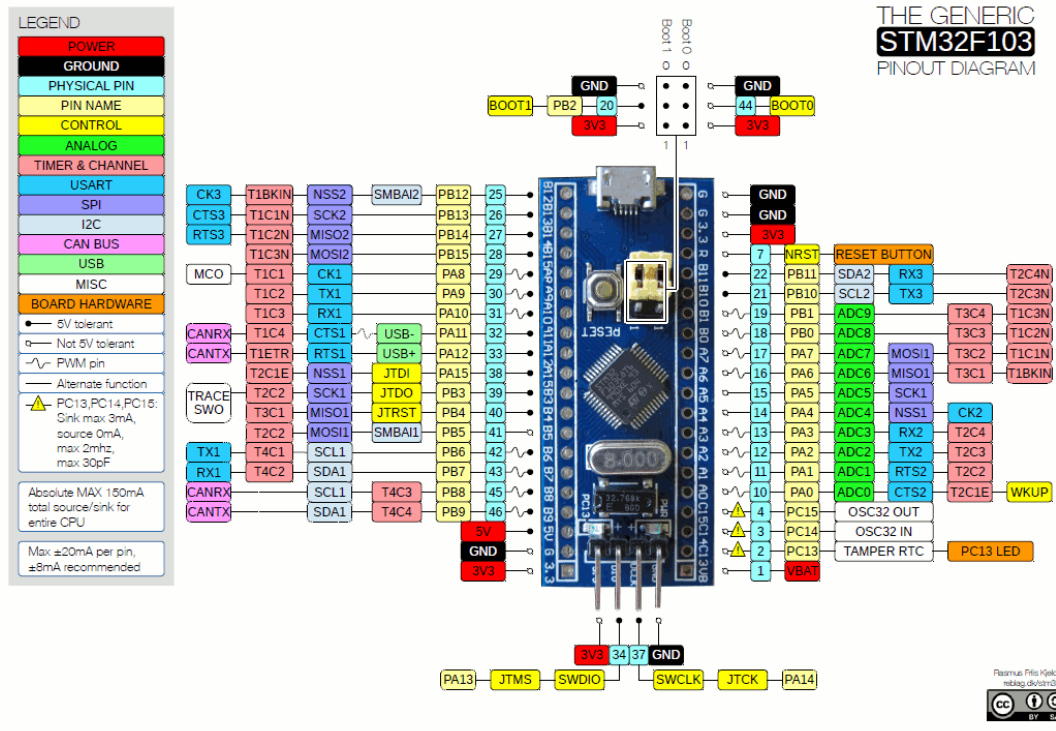


Рисунок 1.23 – Мікроконтролер STM32

Серія STM32U5 поєднує в собі новітнє та найефективніше ядро Arm Cortex-M33 з інноваційною платформою 40 нм, яка зменшує споживання енергії до дуже малих значень, одночасно підвищуючи продуктивність. Серія також додає найсучасніші функції, необхідні для сучасних додатків, у тому числі вдосконалену кібербезпеку з апаратним захистом і графічні прискорювачі для багатих графічних інтерфейсів користувача.

Розширені функції безпеки серії STM32L5 використовують Arm Cortex-M33 і його TrustZone для Armv8-M.

Серія STM32L4 пропонує досконалість платформи з наднизьким енергоспоживанням ST з додатковим параметром продуктивності, забезпечуючи 100 DMIPS з інструкціями DSP і модулем вимірювання з плаваючою комою (FPU), більше пам'яті (до 1 Мбайт флеш-пам'яті) та інноваційні функції.

Серія STM32L4+ розширює технологію STM32L4, пропонуючи вищу продуктивність (120 МГц/409 CoreMark, що виконується з внутрішньої флеш-

пам'яті), більший обсяг вбудованої пам'яті (до 2 Мбайт флеш-пам'яті та 640 Кбайт SRAM) і відтворення розширеної графіки без шкоди для наднизьких - споживання енергії.

Серія STM32L0 пропонує найбільш енергозберігаюче рішення для програм початкового рівня. STM32L0, доступний у мініатюрних корпусах до 14 контактів і з широким діапазоном щільності флеш-пам'яті від 8 до 192 Кбайт, має наднизьке енергоспоживання.

Серія STM32F0 — це приваблива альтернатива 32-розрядним мікроконтролерам 8-ми і 16-розрядним мікроконтролерам для інженерів, які прагнуть підготувати прототип та стандартизувати свою розробку на основі галузевого стандарту ядер ARM cortex M0.

Серія STM32G0 — це нове покоління ефективних мікроконтролерів на основі ядер ARM cortex M0+, що забезпечує покращення зниження витрат на BOM, продуктивності, споживання та інтеграції.

Серія STM32G0 підтримує більший асортимент пакетів і пам'яті, водночас демонструючи основні компоненти сімейства STM32 що особливо добре підходить для чутливих до витрат проектів.

Серія STM32F1, піонер сімейства STM32 32-розрядних мікроконтролерів Arm Cortex, пропонує високу продуктивність із першокласними периферійними пристроями в поєднанні з високим рівнем інтеграції за доступними цінами з простою архітектурою та простими у використанні інструментами.

Серія STM32F3 поставляється з багатим вибором передових аналогових периферійних пристроїв, що забезпечує найвимогливіше керування в режимі реального часу для споживчих і промислових застосувань.

Розглянемо ще один варіант – мікроконтролер Arduino, це один з найпоширеніших мікроконтролерів, особливо серед початківців, така популярність завдячує низькій ціні мікроконтролера та плат на його основі, великій кількості готових рішень для різноманітних датчиків, простота використання, велика кількість навчальних матеріалів. Цей мікроконтролер

побудовано на основі архітектури AVR, розглянемо більш детально характеристики високопродуктивного 8 бітного мікроконтролера ATmega328 який є основою плат сімейства Arduino (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Загальні характеристики мікроконтролеру ATmega328

Мікроконтролер	ATmega328
Тип пам'яті	Flash
Об'єм пам'яті (Кб)	32
Тактова частота (МГц)	20
Об'єм EEPROM пам'яті (байтів)	1024
Ядро	AVR
Ширина шини даних (біт)	8
Об'єм RAM (Кб)	2
Вбудовані інтерфейси	I2c, spi, uart
Мінімальна напруга живлення (В)	1,8
Максимальна напруга живлення (В)	5,5
Мінімальна робоча температура (градусів Цельсію)	-40
Максимальна робоча температура (градусів Цельсію)	+85
Кількість виводів	23
Варіанти корпусу	DIP28, TQFP-32

Плат на основі ATmega328 існує велика кількість, ось деякі з них:

а) Arduino Uno – найбільш поширена плата сімейства Arduino, укомплектована мікроконтролером ATmega328, який може бути у DIP або SMD корпусі;

б) Arduino Uno Wi-Fi [41];

в) Arduino Leonardo – в якості особливості має контролер 32U4 із вбудованим інтерфейсом USB, це дає можливість використовувати плату у якості емулятора джойстика або клавіатури;

г) Arduino Due – на відміну від інших плат сімейства Arduino побудованих на восьми бітних контролерах, має 32 бітний процесор Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 з тактовою частотою 84 МГц. До особливостей плати слід віднести підвищену точність аналого-цифрового перетворювача, наявність вбудованого послідовного порту, окремі виводи цифро-аналогового перетворювача;

д) Arduino Mega – побудована на основі мікроконтролера ATmega 2560, головна особливість – це наявність п'яти десяти чотирьох цифрових входів-виходів. Також плата має більшу кількість аналогових входів і послідовних портів;

е) Arduino Mega ADK – на відміну від Arduino Mega має додаткову функціональність інтерфейсу USB, яка дозволяє з'єднання з телефоном який керується системою Android [42][43];

Arduino Nano – компактна плат з інтерфейсом USB Mini-B (рис 1.25) [42]; Arduino Nano базується на чипі ATmega328, але є ревізії на чипі ATmega168, вони відрізняються кількістю flash-пам'яті – 32Кб та 16Кб відповідно, та об'ємом ОЗУ – 2Кб та 1Кб відповідно. Плата має альтернативні виводи для прошивки через програматор по інтерфейсу ICSP, основний інтерфейс для прошивки та живлення плати - це Mini-USB. Arduino Nano має інтерфейс I2C для спілкування з периферійними пристроями, для роботи з ними використовується бібліотека Wire.

ж) Arduino Micro;

з) Arduino Zero.

Кожна з цих плат має на борту контролер ATmega328 (рис. 1.24), моделі плат відрізняються різною кількістю виводів та мають різний форм фактор. Таким чином ми можемо підібрати конкретну модель під потреби нашого проекту.

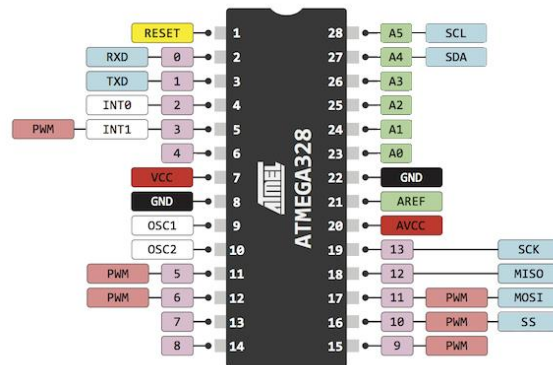


Рисунок 1.24 – Схема виводів мікроконтролера ATmega328 в корпусі DIP28

Перший вивід на мікроконтролері (рис. 1.24) це скидання, виводи під назвами A0, A1, A2, A3, A4, A5 – це аналогові виводи, під номером 2-6, 11-14, 15-19 – цифрові виводи мікроконтролера. Ніжки 8 та 22 це земля, 7 відповідає за живлення. На 2 та 3 ніжці розташовано RX та TX виводи відповідно, ці виводи являються частиною UART інтерфейсу для передачі даних між двома пристроями. TX – відповідає за відправку бінарних даних, RX – за прийом даних. При з'єднанні двох пристроїв RX вивід одного приєднується до TX виводу іншого, а також додатково поєднуються GND виводи обох пристроїв.

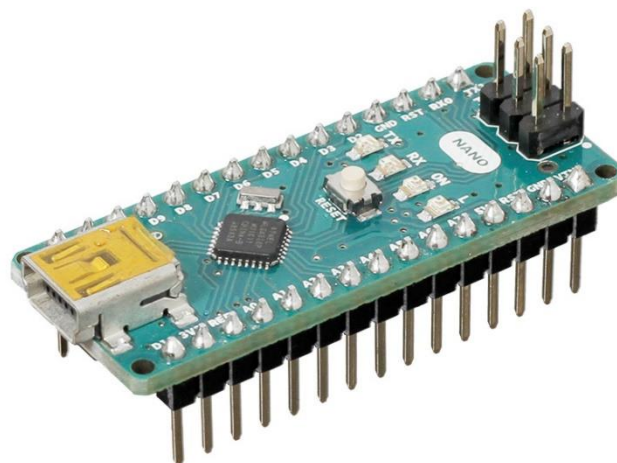


Рисунок 1.25 – Зовнішній вигляд плати Arduino Nano на мікроконтролері ATmega328

Іншим поширеним контролером є ESP8266 (табл. 1.3). ESP8266 – являє собою мікроконтролер з інтерфейсом Wi-Fi (рис. 1.26).

Таблиця 1.3 – Загальні характеристики мікроконтролеру ESP8266 [44]

Мікроконтролер	ESP8266
Підтримка Wi-Fi протоколів	802.11 b/g/n/d/e/i/k/r
Напруга живлення (В)	3,3
Енерговитрати	10 мкА – 170 мА
Максимальний обсяг флеш-пам'яті (Мб)	16
Процесор	Tensilica L106
Розрядність процесору (біт)	32
Тактова частота (МГц)	80-160
Об'єм оперативної пам'яті (Кб)	32 + 80
Порти загального призначення	2
Макс. кількість TCP підключень	5



Рисунок 1.26 – Зовнішній вигляд мікроконтролеру ESP8266

ESP8266 має всього вісім контактів – два з них це RX та TX, один вивід живлення, один земля, є вивід перезавантаження, два виводи загального призначення (GPIO) і один керуючий. У ESP8266 (рис. 1.27) виводи можуть мати різні інтерфейси залежно від того для якої операції ми їх використовуємо – вводу чи виводу.

Два вільних GPIO контактів – це GPIO0 та GPIO2. До функцій виводу GPIO0 відноситься вибір режиму загрузки, до обмежень цього виводу відносять неможливість подати на нього високої одиниці. GPIO2 також відповідає за вибір режиму загрузки, а також може використовуватись як TX контакт. До його обмежень відносять неможливість з'єднання з заземленням під час загрузки. Під час загрузки мікроконтролера GPIO2 відправляє дані для налаштування [44].

ESP8266 підтримує лише аналогове зчитування в GPIO. Цей GPIO називається ADC0 і зазвичай позначається як A0 на шовкографії. Максимальна вхідна напруга контакту ADC0 становить від 0 до 1 В при використанні голого чіпу ESP8266. При використанні готової плати, як-от комплект ESP8266 12-E NodeMCU, діапазон вхідної напруги становить від 0 до 3,3 В, оскільки ці плати містять внутрішній подільник напруги.

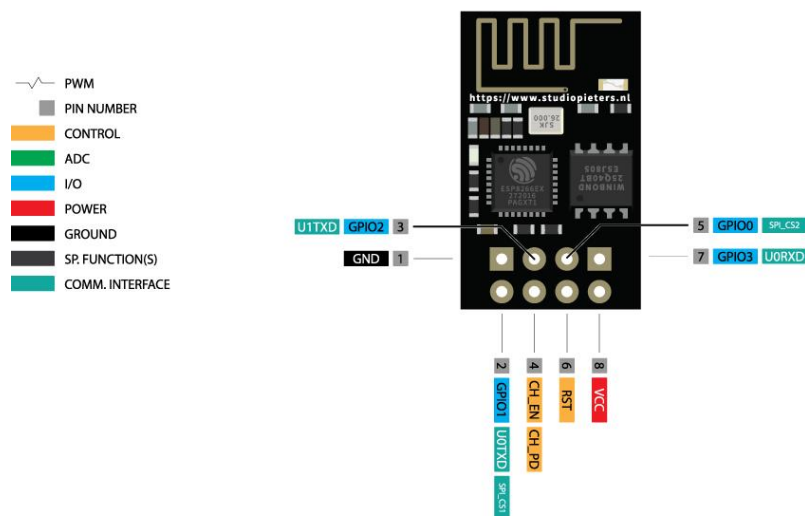


Рисунок 1.27 – Схема виводів мікроконтролера ESP8266

ESP8266EX розроблено для мобільної електроніки та додатків «Інтернет речей» з метою досягнення найнижчого енергоспоживання за допомогою комбінації кількох власних технологій. Архітектура енергозбереження працює в основному в 3 режимах: активний режим, режим сну та режим глибокого сну.

Завдяки використанню вдосконалених методів управління живленням і логіки для вимикання непотрібних функцій і контролю перемикання між сплячим і активним режимами, ESP8266EX споживає приблизно 60 мкА в режимі глибокого сну (з часами RTC, які все ще працюють) і менше 1,0 мА (DTIM=3), або менше 0,5 мА (DTIM=10), щоб залишатися підключеним до точки доступу.

У режимі сну активними залишаються лише відкалібрований годинник реального часу та сторожовий таймер. Годинник реального часу можна запрограмувати для виведення ESP8266EX з будь-якого необхідного інтервалу.

ESP8266EX можна запрограмувати на вихід із режиму сну при виявленні певної умови. Ця функція мінімального часу пробудження ESP8266EX може використовуватися мобільними пристроями SOC, дозволяючи їм залишатися в режимі очікування з низьким енергоспоживанням, доки не знадобиться Wi-Fi.

Щоб задовольнити потребу в електроенергії для мобільної та носимої електроніки, ESP8266EX можна запрограмувати на зменшення вихідної потужності PA відповідно до різних профілів додатків шляхом заміни діапазону на енергоспоживання.

Наведене нижче споживання струму базується на напрузі живлення 3,3 В і температурі навколишнього середовища 25 °C із використанням внутрішніх регуляторів. Вимірювання проводяться на порту антени без SAW-фільтра. Усі вимірювання передавача базуються на 90% робочому циклі, безперервному режимі передачі.

Активний режим вимагає, щоб ЦП працював, як у програмах ШІМ або I2S. Відповідно до стандартів 802.11 (наприклад, U-APSD), він економить енергію, щоб вимкнути схему WiFi-модему, зберігаючи з'єднання WiFi без передачі даних. наприклад у DTIM3, для підтримки циклу сну 300 мс-пробудження 3 мс для отримання пакетів Beacon точки доступу, струм становить близько 15 мА.

Під час режиму сну ЦП може бути призупинено в таких програмах, як WiFi Switch. Без передачі даних схему WiFi-модему можна вимкнути, а ЦП призупинити для економії енергії відповідно до стандарту 802.11 (U-APSD). наприклад у DTIM3, щоб підтримувати цикл сну 300 мс-пробудження 3 мс для отримання пакетів маяків AP, струм становить приблизно 0,9 мА.

Режим глибокого сну не потребує підключення WiFi. Для програм із тривалими затримками між передачею даних, напр. датчик температури, який перевіряє температуру кожні 100 с, режим сну — 300 с і пробудження для підключення до точки доступу (приблизно 0,3–1 с), загальний середній струм становить менше 1 мА.

ESP8266EX оснащено 32-розрядним мікроконтролером (MCU) Tensilica L106, який має надзвичайно низьке енергоспоживання та 16-розрядний RSIC. Тактова частота процесора становить 80 МГц. Він також може досягати максимального значення 160 МГц. Увімкнено операційну систему реального часу (RTOS). Наразі лише 20% MIPS зайнято стеком WiFi, решта може бути використана для програмування та розробки додатків користувача. Для підключення до мікроконтролера, вбудованого в ESP8266EX можна використовувати наступні інтерфейси:

а) Програмовані інтерфейси RAM/ROM (iBus), які можна з'єднати з контролером пам'яті, а також можна використовувати для відвідування зовнішньої флеш-пам'яті;

б) Інтерфейс пам'яті даних (dBus), який можна з'єднати з контролером пам'яті;

в) Інтерфейс АНВ, можна використовувати для відвідування реєстру [44].

1.7 Постановка завдання

Система ультразвукового сканування навколишнього середовища та підібрані компоненти пристрою повинні мати такі характеристики:

- а) невисока вартість виготовлення;
- б) проста у виготовленні конструкція;
- в) можливість її використання для будь-яких схожих пристроїв;
- г) можливість зміни компонентів системи для її переорієнтації;
- д) можливість зручного налаштування пристрою.

2 ОПИС СТРУКТУРИ СИСТЕМИ

2.1 Опис обраної апаратної частини

У сфері мікроконтролерів і одноплатних комп'ютерів часто виділяються чотири контролера: NodeMCU, Arduino, Raspberry Pi і STM32. Кожна з цих платформ має свої унікальні сильні сторони та можливості, що робить їх придатними для різних типів проектів.

NodeMCU — це плата розробки, яка використовує чіп ESP8266 як своє ядро. Він пропонує кілька явних переваг:

- а) NodeMCU має вбудовану підтримку Wi-Fi, яка є важливою для IoT пристроїв;
- б) компактний розмір, його невелика площа робить його ідеальним для IoT пристроїв, де часто простір є обмеженням;
- в) висока потужність обробки, він має 32-розрядний процесор RISC із тактовою частотою 80 МГц;
- г) низьке енергоспоживання, контролер розроблений для меншого споживання енергії, що робить його придатним для пристроїв, що живляться від акумуляторів;
- д) NodeMCU забезпечує просте підключення до датчиків і підтримує збір даних;
- е) відкритий вихідний код, як мікропрограмне забезпечення, так і дизайн прототипної плати є відкритим кодом;
- є) NodeMCU є недорогим рішенням порівняно з іншими платформами IoT.

Arduino UNO — це мікроконтролерна плата, популярна серед початківців завдяки своїй зручності. Він має кілька переваг:

- ж) Arduino UNO доступний у різних формах і розмірах, що підходить для різноманітних проектів;
- з) Arduino UNO має більше аналогових контактів порівняно з NodeMCU;
- и) апаратне та програмне забезпечення Arduino з відкритим кодом забезпечує чудову підтримку від спільноти;
- і) Arduino є чудовим варіантом для початківців, які хочуть зрозуміти основи електроніки завдячуючи своїй економічній ефективності та простоті.

Однак Arduino не має вбудованих можливостей Wi-Fi або IoT.

Raspberry Pi — це міні-комп'ютер, який може працювати на різних операційних системах, таких як Linux, Windows 10 IoT і Android. Він має кілька переваг:

- а) висока обчислювальна потужність, Raspberry Pi використовує чотириядерний процесор ARM, здатний безперервно виконувати ресурсомісткі завдання;
- б) Raspberry Pi вирізняється можливостями пам'яті, пропонуючи моделі з різними розмірами оперативної пам'яті від 1 ГБ до 8 ГБ;
- в) універсальне підключення: Raspberry Pi оснащено вбудованими можливостями Wi-Fi, портом Ethernet для дротових мережевих підключень, а також варіантами підключення через USB і Bluetooth.

Тому Raspberry Pi є більш домінуючим і має більше пам'яті порівняно з Arduino, що робить його ідеальним для більш складних програм.

STM32 — це сімейство 32-розрядних інтегральних схем мікроконтролерів від STMicroelectronics. Він має кілька переваг:

а) низьке енергоспоживання: STM32 відомий своїм низьким енергоспоживанням, що дозволяє використовувати його в пристроях з батарейним живленням;

б) широкий вибір периферійних пристроїв: STM32 має широкий спектр периферійних пристроїв, таких як підтримують UART і шини I2C, що робить їх сумісними з багатьма типами обладнання;

З огляду на усі вище розглянуті платформи та мікроконтролери було обрано NodeMCU він має перевагу перед іншими мікроконтролерами у ціні, також не менш важливим фактором є вбудований модуль Wi-Fi що дає велику перевагу перед продуктами Arduino на базі мікроконтролера Atmega. Також він має достатню обчислювальну потужність, для пристрою, що розробляється у цій роботі.

2.2 Опис обраних мов програмування

Для програмування логіки мікроконтролера NodeMcu буде використано мову Lua. Цей вибір є стандартним для даної платформи. Використання Lua дає багато переваг, таких як: швидкість розробки, простота розробки, велика кількість готових бібліотек з широким функціоналом під будь які задачі.

Lua — це мова сценаріїв, призначена для вбудовування в програми. Він швидкий, легкий і простий у вивченні. Lua можна використовувати для різних цілей, таких як розробка ігор, веб-розробка, аналіз даних тощо. Lua був натхненний іншими мовами, такими як Tcl, Scheme та SOL, але він також представив деякі оригінальні функції, такі як таблиці, співпрограми та метатаблиці.

Lua є мультипарадигмальною мовою, що означає, що вона підтримує різні стилі програмування, такі як процедурне, об'єктно-орієнтоване, функціональне та кероване даними. Lua має простий синтаксис, заснований на

ключових словах і пунктуації, який легко читати і писати. Lua також має потужну структуру даних, яка називається таблицею, яка може представляти масиви, списки, набори, записи, об'єкти тощо. Lua є інтерпретованою мовою, тобто її не потрібно компілювати перед запуском. Натомість код Lua трансліюється компілятором у байт-код, а потім виконується віртуальною машиною. Це робить Lua портативним, оскільки він може працювати на будь-якій платформі, яка має інтерпретатор Lua. Lua також є розширюваним, оскільки він може взаємодіяти з кодом C і C++ і викликати функції із зовнішніх бібліотек.

Lua широко використовується в індустрії програмного забезпечення, особливо в ігровому секторі. Lua також використовується у веб-розробці, оскільки він може працювати на веб-серверах і браузерах, використовуючи такі фреймворки, як LuaJIT, OpenResty та Moonshine. Мова також використовується для аналізу даних, оскільки вона може маніпулювати та візуалізувати дані за допомогою таких бібліотек, як Torch, SciLua та Lua-GD.

Отже, Lua — це універсальна та потужна мова, яка може покращити будь-яку програму за допомогою можливостей сценаріїв.

Для керуючого застосунку системи ультразвукового сканування навколишнього середовища обрано мову програмування C#. Такий вибір дозволить розробити застосунок для будь-якої з перелічених платформ:

- а) Windows;
- б) Android;
- в) IOS;
- г) веб застосунок.

Для розробки застосунку під керуванням операційної системи Microsoft Windows вдалим вибором є фреймворк WinUI (рис. 2.1). Його перевагами є те,

що він поєднує класичне WinAPI та UWP API, це додає гнучкості в розробці та прискорює процес розробки.

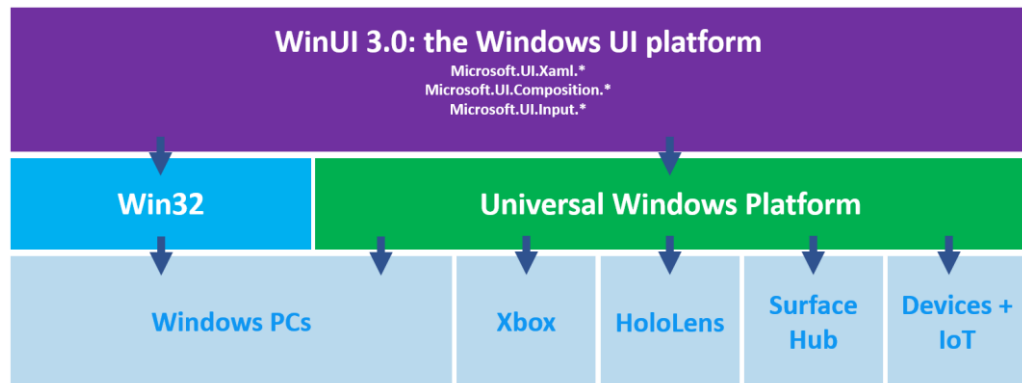


Рисунок 2.1 – Структура фреймворка WinUI

WinUI надає сучасні елементи керування, стилі та функції, які відповідають Fluent Design System, яка є мовою дизайну Microsoft для створення інтуїтивно зрозумілих і доступних інтерфейсів. WinUI 3 відокремлює стек інтерфейсу користувача від операційної системи, надаючи розробникам більше контролю та гнучкості над рівнем інтерфейсу користувача своїх програм.

2.3 Опис обраних датчиків вимірювання дистанції

У якості датчика ультразвукового сканування було обрано HC-SR04. Ультразвуковий датчик HC-SR04 - це пристрій, який може вимірювати відстань до об'єкта за допомогою звукових хвиль. Датчик складається з двох ультразвукових перетворювачів: один випромінює звуковий імпульс високої частоти (40 кГц) і інший приймає відбиту звукову хвилю. Датчик має чотири контакти: VCC, GND, Trig і Echo. Щоб виміряти відстань, мікроконтролер надсилає імпульс 10 мкс на висновок Trig, який запускає передавач, щоб

відправити 8-цикловий звуковий сплеск. Потім штифт Echo піднімається на високий рівень і чекає, поки звукова хвиля відіб'ється від об'єкта. Вивід відлуння стає низьким, коли приймач виявляє відбиту хвилю. Час між наростаючим і спадаючим фронтами штифта Echo пропорційний відстані до об'єкта. Це недорогий і надійний датчик, який може забезпечувати точні та стабільні показання.

2.4 Схема пристрою

Для побудови схеми (рис. 2.2) вирішено використовувати макетну плату. Це дуже полегшить побудову макету та налаштування системи. При потребі можна буде змінити конфігурацію системи. Для живлення системи буде використано батарейки типу «Крона». Альтернативою у готовому пристрою може стати акумулятор, у прототипі його не було використано для здешевлення системи. Плату NodeMCU та датчик вимірювання відстані HC-SR04 з'єднано за допомогою інтерфейсу UART. Велика кількість виводів на платі дозволяє розширити систему, наприклад додати декілька датчиків HC-SR04 для покриття більшої площі поверхні що сканується.

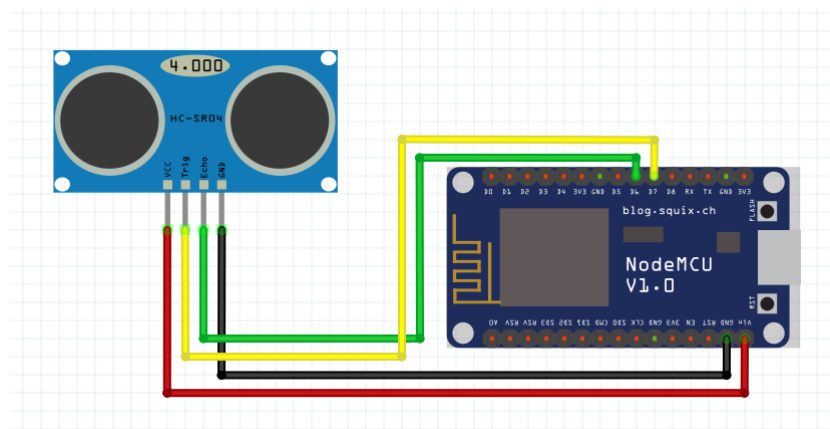


Рисунок 2.2 – Схема підключення датчика вимірювання відстані до мікроконтролера NodeMCU

2.7 Результати моделювання системи

Для моделювання системи буде використано онлайн ресурс Wokwi. При моделюванні було використано ESP8266 замість NODEMCU це зумовлено відсутністю даного компонента в емуляторі.

Процес макетування:

- а) додаємо ESP8266 та HC-SR04 на макетну площину;
- б) під'єднаємо виводи GND та VCC дальноміра до відповідних виводів на мікроконтролері, а також TRIG та ECHO до виводів 5 та 18 відповідно, подібно до схеми на рис. 2.2;
- в) додаємо ініціалізацію контактів в коді (лістинг 2.1);
- г) опишемо логіку отримання дальності з використанням показників датчику (лістинг 2.2);
- д) запускаємо симуляцію (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Результати роботи макета

Вхідними даними у модельованій системі виступають показники відстані, вони створюються емулятором, в реальному макеті це була би відстань до об'єкта на який направлено HC-SR04. В процесі роботи пристрою (макета) кожену секунду робиться отримання часу який витратила хвиля на подолання відстані до цільового об'єкту. Потім ці дані переводяться у сантиметри для більш зручного сприйняття.

Як можемо бачити на рис. 2.3 в консоль виводиться дистанція в сантиметрах, для реального пристрою ми повинні направити ці данні до керуючої програми для візуалізації результатів. Одним з варіантів візуалізації може бути відображення точок (відстані) на координатній площині, відносно положення сенсора, площина матиме вигляд круга. Або можна робити 3Д візуалізацію, для цього потрібно просканувати поверхню, переміщуючи датчик HC-SR04 зліва направо і вниз для 4-х площин кімнати. Таким чином побудуємо рельєф приміщення, максимальна відстань буде виступати в ролі стартової координатної точки, всі інші будуть вираховуватись як: $p_0 - p_x$. Похибка вимірювання складає $3 \text{ мм} / 4000 \text{ мм} * 100 \% = 0,00075\%$.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи досягнуто мету – підвищення ефективності та зменшення вартості пристрою ультразвукового вимірювання навколишнього середовища за рахунок використання мікроконтролера NodeMCU.

Результати кваліфікаційної роботи полягають у розробці структури, програмного та апаратного забезпечення пристрою ультразвукового вимірювання навколишнього середовища. Підборі мови програмування та технологій для розробки програмного застосунка, який матиме можливість керувати налаштуваннями мікроконтролера в цілях завдання режиму роботи або візуалізації результатів вимірювання.

Також було підібрано компоненти системи, які відповідають умовам зазначеним у меті кваліфікаційної роботи.

Пристрій ультразвукового сканування навколишнього середовища є дуже корисною системою яка має безліч застосувань, таких як сканування кімнати або іншого приміщення для створення 3D моделі з подальшим використанням для розробки дизайну, плануванні приміщення, тощо. Також така система може використовуватись для сканування складно доступних місць, таких як, морське дно, печери. Ще одним методом застосування може бути контроль якості залізничного полотна.

Для подальшого розвитку проекту можна пропонувати такі удосконалення:

а) оптимізувати кількість датчиків для більш швидкого сканування, розподілення роботи;

б) додати сервопривід для автоматичного сканування площини;

- в) розширити ряд підтримуваних платформ для керуючого додатку (реалізувати керування за допомогою Android та IOS систем, веб застосунку);
- г) розробити компактний корпус для готового пристрою;
- д) вдосконалити додаток, наприклад додати статистику використання, більш функціональні методи візуалізації результатів, конвертацію результатів в 3D об'єкт якій підтримується програмами для 3D моделювання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Murata [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.murata.com/en-us/products/sensor/ultrasonic/overview/apps>
2. Mdpi [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/21/7345>
3. Keyence [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.keyence.com/ss/products/sensor/sensorbasics/ultrasonic/info/>
4. Georges Kouroussis, Damien Kinet, Véronique Moeyaert, Christophe Caucheteur, DEVELOPMENT OF STRUCTURAL RAILWAY MONITORING SOLUTIONS USING FBG SENSORS.
5. Kouroussis, G. and Verlinden, O. Prediction of railway induced ground vibration through multibody and finite element modelling, Mechanical Sciences, 4 (1), 167–183, (2013).
6. Гречмак Д.В., Використання радіолокаційних приладів для дослідження навколишнього середовища.
7. Rachel L. Tilling, Tun Jan Young, Poul Christoffersen, Lai Bun Lok, Paul V. Brennan and Keith W. Nicholls. Radar observations of Arctic ice pp. 27-39 (13 pages).
8. Junkun Yan, Hao Jiao, Wenqiang Pu, Chenguang Shi, Jinhui Dai, Hongwei Liu - Radar sensor network resource allocation for fused target tracking: A brief review.
9. C.J. Baker, A.L. Hume - Netted radar sensing IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag., 18 (2) (2003), pp. 3-6, [10.1109/MAES.2003.1183861](https://doi.org/10.1109/MAES.2003.1183861)
10. W. Fang, X. Song, *et al.* - Novel efficient deployment schemes for sensor coverage in mobile wireless sensor networks, Inf. Fusion, 41 (2018), pp. 25-36, [10.1016/j.inffus.2017.08.001](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2017.08.001)
11. V. Amanipour, A. Olfat - CFAR detection for multistatic radar, Signal Process, 91 (1) (2011), pp. 28-37, [10.1016/j.sigpro.2010.06.003](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.06.003)

12. M. Hernandez, T. Kirubarajan, Y. Bar-Shalom - Multisensor resource deployment using posterior Cramér-Rao bounds, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 40 (2) (2004), pp. 399-416, [10.1109/TAES.2004.1309993](https://doi.org/10.1109/TAES.2004.1309993)
13. P. Tichavsky, C.H. Muravchik, A. Nehorai - Posterior Cramér -Rao bounds for discrete-time nonlinear filtering, *IEEE Trans. Signal Process.*, 46 (5) (1998), pp. 1386-1396, [10.1109/78.668800](https://doi.org/10.1109/78.668800)
14. X. Song, P. Willett, S. Zhou - On fisher information reduction for range-only localization with imperfect detection, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 48 (4) (2012), pp. 3694-3702, [10.1109/TAES.2012.6324762](https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6324762)
15. C. Liu, K. Wu, T. He - Sensor localization with ring overlapping based on comparison of received signal strength indicator, *IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems* (2004), pp. 516-518, [10.1109/MAHSS.2004.1392193](https://doi.org/10.1109/MAHSS.2004.1392193)
16. H. Godrich, A.M. Haimovich, R.S. Blum - Target localization accuracy gain in MIMO radar-based systems, *IEEE Trans. Inf. Theory.*, 56 (6) (2010), pp. 2783-2803, [10.1109/TIT.2010.2046246](https://doi.org/10.1109/TIT.2010.2046246)
17. Y. Cheng, X. Wang, M. Morelande, *et al.* - Information geometry of target tracking sensor networks, *Inf. Fusion*, 14 (3) (2013), pp. 311-326, [10.1016/j.inffus.2012.02.005](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2012.02.005)
18. H.L. Van Trees - *Optimum Array processing: Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part IV*, John Wiley and Sons, New York (2002)
19. J.K. Yan, H.W. Liu, B. Jiu, *et al.* - Power allocation algorithm for target tracking in unmodulated continuous wave radar network, *IEEE Sens. J.*, 15 (2) (2007), pp. 1098-1108, [10.1109/JSEN.2014.2360039](https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2360039)
20. S. Blackman, R. Popoli - *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*, MA artech house, Norwood (1999)
21. B. Ristic, S. Arulampalam, N. Gordon - *Beyond The Kalman Filter: Particle Filters For Tracking Applications*, Artech House, Norwood (2004)
22. V.A. Bavdekar, A.P. Deshpande, S.C. Patwardhan - Identification of process and measurement noise covariance for state and parameter estimation using

- extended Kalman filter, *J. Process. Control*, 21 (4) (2011), pp. 585-601, [10.1016/j.jprocont.2011.01.001](https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2011.01.001)
23. J. Ma, S. Sun - Centralized fusion estimators for multisensor systems with random sensor delays, multiple packet dropouts and uncertain observations, *IEEE Sens. J.*, 13 (4) (2013), pp. 1228-1235, [10.1109/JSEN.2012.2227995](https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2227995)
24. H. Talebi, A.M.A. Hemmatyar - Asynchronous track-to-track fusion by direct estimation of time of sample in sensor networks, *IEEE Sens. J.*, 14 (1) (2014), pp. 210-217, [10.1109/JSEN.2013.2281394](https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2281394)
25. Ronald P.S. Mahler - *Advances in Statistical Multisource-Multitarget Information Fusion* (2014)
26. N.A. Carlson - Federated square root filter for decentralized parallel processors, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 26 (3) (1990), pp. 517-525, [10.1109/7.106130](https://doi.org/10.1109/7.106130)
27. Y.F. Zhou, H. Leung, P.C. Yip - An exact maximum likelihood registration algorithm for data fusion, *IEEE Trans. Signal Process.*, 45 (6) (1997), pp. 1560-1573, [10.1109/78.599998](https://doi.org/10.1109/78.599998)
28. X.R. Li, Y.M. Zhu, J. Wang, C.Z. Han - Optimal linear estimation fusion. I. Unified fusion rules, *IEEE Trans. Inf. Theory*, 49 (9) (2003), pp. 2192-2208, [10.1109/TIT.2003.815774](https://doi.org/10.1109/TIT.2003.815774)
29. S.S. Gao, Y.M. Zhong, W. Li - Random weighting method for multisensor data fusion, *IEEE Sensors J.*, 11 (9) (2011), pp. 1955-1961, [10.1109/JSEN.2011.2107896](https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2107896)
30. S. Särkkä - *Fundamentals of Object Tracking*, Cambridge University Press (2013)
31. Y. Bar-Shalom, T.E. Fortmann - *Tracking and Data Association*, Academic, press (1988)
32. Z. Ding, H. Leung, L. Hong - Decoupling joint probabilistic data association algorithm for multiple target tracking, *IEE Proc. Radar Sonar Navig.*, 146 (5) (1999), pp. 251-254, [10.1049/ip-rsn:19990709](https://doi.org/10.1049/ip-rsn:19990709)

33. L.H. David, L. James - Handbook of Multisensor Data Fusion, CRC Press, New York (2008)
34. D. Schuhmacher, B.-T. Vo, B.-N. Vo - A consistent metric for performance evaluation of multi-object filters, IEEE Trans. Signal Process., 56 (8) (2008), pp. 3447-3457, [10.1109/TSP.2008.920469](https://doi.org/10.1109/TSP.2008.920469)
35. J.K. Yan, P. Zhang, J.H. Dai, H.W. Liu - Target capacity based simultaneous multibeam power allocation scheme for multiple target tracking application, Signal Process, 178 (2021), [10.1016/j.sigpro.2020.107794](https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2020.107794)
36. N. Zheng, Y. Sun, X.Y. Song, S. Chen - Joint resource allocation scheme for target tracking in distributed MIMO radar systems, J. Syst. Eng. Electron, 30 (4) (2019), pp. 709-719, [10.21629/JSEE.2019.04.09](https://doi.org/10.21629/JSEE.2019.04.09)
37. Y. Bar-Shalom, X.R. Li, T. Kirubarajan - Estimation With Applications to Tracking and Navigation, John Wiley and Sons, New York (2001)
38. Гречмак Д.В., Порівняння сучасних комп'ютерних архітектур risc, risc-v, arm.
39. Analog [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/uart-a-hardware-communication-protocol.html>
40. Wikipedia [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://en.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>
41. Arduino Hardware [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.arduino.cc/en/hardware>
42. Проекты с использованием контроллера Arduino, 2-е издание. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 464 с.
43. Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry 1st Edition. - Wiley; 1st edition (July 22, 2013). – 384 с.

44. ESP8266EX Datasheet [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
<https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents>
45. ntrs.nasa.gov [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20200002665/downloads/20200002665.pdf>
46. Random Nerd Tutorials [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:
<https://randomnerdtutorials.com/complete-guide-for-ultrasonic-sensor-hc-sr04/>