

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КІЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології
в приладобудуванні»**

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

**на тему: «Автоматизований портативний комплекс виявлення та аналізу
радіосигналів»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПМ11

Погорелов Богдан Юрійович

Керівник:

Асистент кафедри АСКТН

Повщенко Олександр Анатолійович

Рецензент:

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Юрій КИРИЧУК
«____» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Погорєлов Богдан Юрійович

1. Тема роботи «Автоматизований портативний комплекс виявлення та
аналізу радіосигналів», керівник роботи Повщенко Олександр Анатолійович
д.ф., затверджені наказом по університету від «____» _____ 20__ р.
№_____

2. Термін подання студентом роботи
04.06.2024

3. Вихідні дані до роботи: _____

4. Зміст роботи: Вступ, аналітичний огляд, розробка та розрахунок вузлів
функціональної схеми, підбір елементів системи, розробка елементів корпуса

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): схема електрична функціональна, схема електрична принципова, складальне креслення корпусу, 2 плакати А1

6. Дата видачі завдання 14.04.2024.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Формульовання завдання дипломної роботи	20.04.2025	виконано
2	Проведення аналітичного огляду	30.04.2025	виконано
3	Систематизація теоретичного матеріалу	05.05.2025	виконано
4	Розробка структурної схеми	07.05.2025	виконано
5	Підбір компонентів	14.05.2025	виконано
6	Розробка креслиників	18.05.2025	виконано
7	Формування загальних висновків	26.05.2025	виконано
8	Оформлення курсової роботи	30.05.2025	

Студент

Погорєлов Богдан Юрійович

Керівник

Повшенко Олександр Анатолійович

АНОТАЦІЯ

В роботі запропоновано використання автоматизованого портативного комплексу для підвищення ефективності прийому, обробки та аналізу радіосигналів. Даний комплекс може бути використано для підвищення завадостійкості роботи каналу зв'язку передачі даних між центром керування та БПЛА. Проаналізовано сучасні підходи до реалізації таких систем.

Ключові слова: автоматизований комплекс, цифрова обробка сигналів, БПЛА, радіосигнали.

Automated Portable System for Radio Signal Detection and Analysis

ANNOTATION

The paper proposes the use of an automated portable complex to improve the efficiency of receiving, processing, and analyzing radio signals. This complex can be used to increase the noise immunity of the data communication channel between the control center and the UAV. Modern approaches to the implementation of such systems are analyzed.

Keywords: automated complex, digital signal processing, UAV, radio signals.

Зміст

ВСТУП.....	10
2 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ПОРТАТИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗУ РАДІОСИГНАЛІВ.....	13
2.1 Опис технологій.....	13
2.1.1 Радіостанція Hack RF One Portapack H4 Mayhem SDR 1 МГц – 6 ГГц.....	14
2.1.2 Радіостанція Libre SDR PLUTO з Zynq 7020 70 МГц – 6 ГГц.....	16
2.1.3 Радіостанція 1.10D DSP SDR 10 МГц-2 ГГц.....	18
2.1.4 Радіостанція Amator SDR 1 МГц - 6 ГГц.....	20
2.1.5 Радіостанція Malahit DSP2 SDR Radio Firmware 2.40 Receiver 10 кГц - 2 ГГц.....	24
2.2 Висновок по розділу 1.....	27
3 Розробка АПКВАР (автоматизованого портативного комплексу).....	28
3.1 Розробка структурної схеми.....	30
3.2 Підбір елементної бази.....	32
3.2.1 Антени.....	34
3.2.2 Пристрій захоплення радіосигналу.....	36
3.2.3 Центральне ядро обчислень.....	44

3.2.4 Пристрій GPS.....	48
3.2.5 Пристрій збереження даних.....	51
3.2.6 Дисплей.....	54
3.2.7 Батарея.....	58
3.2.8 Материнська плата.....	66
3.3 Розробка принципової електричної схеми.....	71
3.3.1 Процесорний модуль та його інтерфейси:.....	71
3.3.2 Організація кола живлення.....	75
3.3.3 Реалізація інтерфейсів та роз'ємів.....	80
3.3.4 Реалізація високошвидкісних інтерфейсів та роз'ємів.....	86
3.3.5 Реалізація інтерфейсу M2.....	90
3.3.6 Загальна компоновка та 3D вигляд друкованої плати.....	95
3.4 Розробка корпусу.....	99
3.4.1 Деталі корпусу.....	99
3.5 Висновок по розділу 2.....	102
4 МЕТОДОЛОГІЯ РОБОТИ АПКВАР.....	104
4.1 Приймання радіосигналів за допомогою технології SDR.....	104
4.2 Приймання та обробка радіосигналів за допомогою технології SDR...	108

4.3 Висновок по розділу 3.....	114
5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИПРОБУВАННЯ.....	116
5.1 Прийом радіосигналу аналогової рації.....	116
5.2 Прийом супутниковых зображень.....	123
5.3 Висновок по розділу 4.....	127
ВИСНОВОК.....	129
Список використаних джерел.....	132

ВСТУП

Сучасний світ характеризується стрімким розвитком інформаційно-комунікаційних технологій, широким впровадженням бездротових систем зв’язку та підвищеними вимогами до автономності, мобільності та безпеки технічних засобів. Особливої актуальності набувають портативні комп’ютерні комплекси (ПКК), які здатні забезпечити виконання спеціалізованих завдань у віддалених або екстремальних умовах — без прив’язки до інфраструктури, за умов обмежених ресурсів, часто з ризиком втручання або радіочастотних загроз.

Однією з критично важливих функцій таких пристройів є виявлення, прийом, обробка та аналіз радіосигналів у широкому частотному діапазоні. Це необхідно як у військовій сфері (виявлення джерел випромінювання, забезпечення захищеного зв’язку, радіорозвідка), так і в цивільних застосуваннях — від аварійно-рятувальних операцій до дослідницьких польових місій, роботи з дронами, моніторингу спектра тощо.

У зв’язку з цим зростає інтерес до створення відкритих, гнучких і водночас надійних технічних рішень — зокрема, до автоматизованих портативних комплексів для виявлення та аналізу радіосигналів, побудованих на основі відкритого програмного й апаратного забезпечення. Відкритість технологій у цьому контексті не лише забезпечує прозорість та безпеку, а й дозволяє адаптувати пристрій під конкретні задачі, оновлювати його та масштабувати залежно від умов застосування.

Метою цієї дипломної роботи є розробка концепції, апаратної архітектури та обґрунтування вибору елементної бази для створення

автономного портативного комплексу виявлення та аналізу радіосигналів. Пристрій має відповідати сучасним вимогам щодо енергоефективності, компактності, багатофункціональності, можливості роботи в реальному часі, захищеності та відкритості.

Для досягнення поставленої мети в роботі виконано:

- аналітичний огляд сучасних програмно-визначуваних радіосистем (SDR) та порівняльний аналіз їх характеристик;
- розробку структурної схеми комплексу з урахуванням вимог до функціоналу та експлуатаційних умов;
- підбір оптимальної елементної бази для побудови комплексу;
- обґрунтування вибору ключових компонентів системи;
- опис програмного забезпечення та його ролі в забезпеченні функціональності комплексу.

Об'єктом дослідження є технічні рішення та апаратно-програмні засоби для побудови SDR-комплексів.

Предметом дослідження виступає архітектура та елементна база автоматизованого портативного комплексу для виявлення і аналізу радіосигналів. Наукова новизна полягає у поєднанні відкритої архітектури, сучасних SDR-технологій і модульного підходу до побудови польового пристрою з можливістю адаптації до конкретних сценаріїв використання.

Практична значущість результатів полягає в можливості створення на їх основі реального функціонального зразка пристрою, придатного для

автономного використання в польових умовах — як у професійних, так і аматорських або освітніх цілях.

2 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ПОРТАТИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

ВИЯВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗУ РАДІОСИГНАЛІВ

У цьому розділі розглядаються сучасні портативні комплекси для виявлення, аналізу та обробки радіосигналів, що використовуються для моніторингу, тестування та дослідження у сфері радіозв'язку. Особлива увага приділяється програмно-визначуваним радіостанціям (SDR), які забезпечують гнучкість, багатофункціональність та можливість роботи у широкому діапазоні частот.

2.1 Опис технологій

Програмно-визначуване радіо (SDR, Software Defined Radio) — це підхід, при якому більшість функцій традиційного радіоапаратного забезпечення (наприклад, фільтрація, демодуляція, обробка сигналу) реалізується програмно, а не апаратно. Це дозволяє змінювати режими роботи пристрою, підтримувати різні протоколи та стандарти без необхідності заміни апаратної частини. Основні переваги SDR:

- Універсальність — можливість роботи з різними типами сигналів та протоколів.
- Гнучкість — швидка зміна налаштувань, частот, режимів роботи через програмне забезпечення.
- Компактність і портативність — сучасні SDR-пристрої мають невеликі розміри та можуть працювати автономно.
- Масштабованість — можливість оновлення функціоналу шляхом зміни або доповнення програмного забезпечення.

- Широкий спектр застосування — від моніторингу стільникових мереж і аналізу бездротових протоколів до тестування безпеки, наукових досліджень та навчання.

SDR-комплекси дозволяють здійснювати прийом, аналіз, запис, відтворення та передачу радіосигналів у широкому частотному діапазоні, що робить їх незамінними інструментами для фахівців у сфері радіозв'язку, радіоаматорів, дослідників та інженерів.

2.1.1 Радіостанція Hack RF One Portapack H4 Mayhem SDR 1 МГц – 6 ГГц.

Програмно-визначувана радіостанція HackRF One з додатковим модулем PortaPack H4 та програмним забезпеченням Mayhem – універсальне портативне рішення для роботи, передачі і аналізу радіосигналів в широкому діапазоні частот. Цей пристрій створено на відкритому вихідному коді та володіє великим спектром застосування: моніторинг стільникових мереж, аналіз бездротових протоколів, програмування та експлуатація радіочастот, тестування безпеки бездротових мереж і багато іншого [1].



Рис 1.1. One Portapack H4 Mayhem

Оновлений модуль PortaPack H2 додає до функціоналу HackRF One кольоровий сенсорний дисплей, навігаційні кнопки і енкодер для керування.

А встановлене програмне забезпечення Mayhem розширює можливості аналізу, експлуатації та тестування бездротових мереж.

На відміну від попередньої версії, H4 володіє покращеним матовим екраном, портом GPIO для додаткових аксесуарів, екранів та датчиків. Також переробленою системою живлення: один перемикач вкл/викл живлення; покращеною архітектурою керування батареєю: швидкою зарядкою через Type-C; відсутністю витоку живлення і розрядки акумулятора.

Вбудований повзунковий перемикач для швидкого перемикання між внутрішнім і зовнішнім мікрофоном/навушниками. Новий вбудований мікрофон дозволить використовувати H4 в якості повноцінного голосового присмопередавача.

Характеристики

- Версія: v2.0.2
- Робота в режимі: напівдуплекс
- Діапазон частот: 1 МГц – 6 ГГц
- Підтримувана частота дискретизації: від 2 до 20 млн семплів в секунду
- Програмно-керуючий смуговий фільтр на прийом і передачу
- Програмно-контрольоване живлення антенного порта (до 50 мА на 3.3 В)
- Сенсорний кольоровий РК-екран з діагоналлю 3.2”
- Вбудований динамік
- Зручні кнопки для програмування
- Роз’єм антени: SMA-мама
- Роз’єм для навушників/мікрофона: 3.5 мм

- Роз'єм GPIO для підключення
- Живлення: вбудований акумулятор, ємністю 2500 мАг
- Матеріал корпусу: ABS-пластик
- Розміри: 8 x 12.5 x 2.5 см

2.1.2 Радіостанція Libre SDR PLUTO з Zynq 7020 70 МГц – 6 ГГц.

LibreSDR є аналогом популярного SDR-модуля ADALM-PLUTO (або PlutoSDR), який зроблений у металевому корпусі для ефективнішого розсіювання тепла та міцності[2].



Рис 1.2. LibreSDR PLUTO з Zynq7020

Пристрій спроектований на друкованій платі з використанням 8-бітної мікросхеми ЦАП. На самій платі містяться наступні роз'єми:

- два коаксіальні роз'єми MMCX (мама) для інтерфейсів синхронізації 1 PPS і 10 МГц;
- роз'єм RJ-45 для інтерфейсу Gigabit Ethernet, через який відбувається передавання IQ-складників сигналу та доступ у консоль вбудованої ОС Linux;
- два роз'єми Type-C (OTG і Debug):

- OTG для доступу в консоль вбудованої Linux з послідовного порту
- Debug для налагодження та завантаження вбудованого ПЗ засобами Xilinx через інтерфейс JTAG
- обидва роз'єми також використовуються для живлення LibreSDR
- роз'єм MicroSD;
- 4 коаксіальні роз'єми SMA (мама) для двох приймальних і двох передавальних каналів.

Також на пристрой є прихована кнопка DFU для відновлення заводського вбудованого ПЗ. У LibreSDR інтегрований радіочастотний трансивер AD9363.

Характеристики

- Використання чіпа XC7Z020-2CLG400I xc7z020-2I
- Чип AD9363 налаштований на використання чипа AD9361 з діапазоном частот 70 МГц ~ 6 ГГц
- Канали: 2 TX, 2 RX
- Розрядність ЦАП/АЦП: 12 біт
- Діапазон частот: 70 МГц – 6 ГГц
- Вихідна частота: VCTCXO 40 МГц 0.5 стор./хв
- SOC: для Zynq7010 FPGA: 28 Кб
- ОЗП: 512 Мб
- FLASH: 32 Мб
- USB: 2.0, підтримка OTG
- Ethernet: 1000 Мб

- MicroSD можна використовувати для завантаження
- Вхід постійного струму: 5 В, 2 А, MicroUSB
- Підтримка дуплексів: TDD, FDD
- Смуга пропускання: від 200 кГц до 20 МГц
- Матеріал: алюміній
- Розмір: 11.3 x 7.2 x 3 см
- Вага: 565 г

2.1.3 Радіостанція 1.10D DSP SDR 10 МГц-2 ГГц

Приймач 1.10D DSP SDR[3] від 10 кГц до 2 ГГц має наступні особливості:

1. Режим демодуляції: Приймач DSP SDR з використанням AM, SSB, NFM, WFM, CW. На основі архітектури SDR, використовуючи передній кінець msi001 RF для 12-бітної кількісної вибірки, використовуючи процесор stm32h743, основна частота до 480 МГц.
2. Чутливість і тривалий термін служби батареї: Цей приймач DSP SDR має частотний діапазон 10 кГц–2,0 ГГц (Зареєстрована версія 1.10d) з s,w 0,3 міковольт 10 дБ на частоті до 250 МГц. Вбудований акумулятор ємністю 3000мАг забезпечує тривале відтворення.
3. Фільтри: Приймач DSP SDR радіо підтримує подвійний антенний вхід, модуль фільтра загасання переднього кінця, загасання до 30 дБ, високий опір введення, поліпшенну короткохвильову чутливість, додати чотири додаткових фронтальних фільтра.
4. Багатофункціональна: Цей короткохвильовий радіоприймач DSP SDR має потужні вбудовані функції зі змінною ширинною фільтра, адаптивного

- шумозаглушувача, порогового шумозаглушувача, шумозаглушувача, AGC, еквалайзера.
5. Підключення до USB: 3,5-дюймовий ємнісний сенсорний екран. Корпус друкованої плати, краща радіочастотна продуктивність, через USB-підключення до комп’ютера, для кота, IQ і звуковий зв’язок може бути реалізований.



Рис 1.3. 1.10D DSP SDR

Специфікація:

- Тип елемента: приймач DSP SDR
- Матеріал: PCB
- Акумулятор: літій-іонний акумулятор 503450 (Побудований в), Ємність: 3000mAh
- Екран: 3,5-дюймовий IPS ємнісний сенсорний екран
- Демодуляція: AM, SSB, NFM, WFM, CW
- Значення частоти: діапазон від 50 кГц до 49,999 МГц, від 50,001 МГц до 249,999 ГГц, від 400 МГц до 2 ГГц
- MCU: потужний stm32h743 із тактовою частотою 480 МГц.

- Потужні функції: змінна ширина фільтра, адаптивний шумоподавлювач, пороговий шумоподавлювач, шумоподавлювач, AGC, еквалайзер.
- Мікросхема демодуляції: використовуйте повністю функціональну, високоінтегровану та надійну мікросхему msi001.
- Підключено: через USB-з'єднання з комп'ютером, для коду, IQ та звукового зв'язку можна реалізувати.

2.1.4 Радіостанція Amator SDR 1 МГц - 6 ГГц.

Радіостанція Amator SDR 1 МГц - 6 ГГц.[4] має наступні особливості:

1. 3,5 мм звуковий роз'єм: Цей радіотрансивер використовує 3,5-мм аудіороз'єм, тому, підключивши мікрофон, ви можете просто натиснути та утримувати праву бічну кнопку, щоб здійснити дзвінок.
2. Прийом кількох голосових повідомлень: Цей радіотрансивер підтримує прийом голосу в діапазонах SSB, AM, вузькосмугового FM, широкосмугового FM зі спектральним водоспадом.
3. Спіймати та відтворити: Цей радіоприймач дуже спрощує прийом та відтворення бездротових сигналів з пультів дистанційного керування діапазону ISM.
4. Апаратне забезпечення завершено: Цей радіотрансивер оснащений 3,2-дюймовим резистивним сенсорним екраном, навігаційними перемикачами, радіо-виходами, мікрофонними входами, інтерфейсом DC 2.1 та 4-шаровим позолоченим покриттям.
5. Широке застосування: Цей радіоприймач має широкий спектр застосування та може використовуватися на кораблях, автомобілях,

електронних лічильниках комунальних послуг, для моніторингу транспондерів тощо.



Рис 1.4. 1 МГц-6GHz SDR

Специфікація:

- Тип пристрою: Радіоприймач
- Матеріал: Алюмінієвий сплав
- Тип батареї: Літієва батарея 3,7 В 2000 мАг x1 (Поставляється з вбудованою батареєю)
- Антена прийому частотного діапазону: 1 МГц – 6 ГГц

Зловити повтор:

Одна з найкращих переваг радіотрансивера полягає в тому, що він дозволяє дуже легко вловлювати та відтворювати бездротові сигнали з пультів дистанційного керування діапазону ISM. Створіть улов. Все, що вам потрібно зробити, це зайти в меню лову, встановити частоту клавішею пульта дистанційного керування, натиснути червону кнопку запису R та натиснути клавішу на пульті дистанційного керування.

Потім зупиніть запис, щоб зберегти його на карту пам'яті. Тепер ви можете перейти до меню Відтворення, вибрати щойно записаний файл і натиснути кнопку Відтворити. Точно такий же сигнал буде передаватися по повітря, ефективно замінюючи ваш віддалений ключ.

Приймач:

Ви можете легко прослуховувати стандартні радіосигнали NFM та WFM, підключивши динамік до 3,5-мм радіороз'єму Portapack. Прийом ADS В легко вмикається на радіопередавачі, вибравши символ індуктора та блискавки у верхньому правому куті.

Апаратної конфігурації:

- Мікрофон TX
- 3,2-дюймовий, 240 x 320 RGB РК-дисплей з резистивним сенсорним екраном
- Навігаційні перемикачі
- Радіовихід
- Вхід мікрофона
- Роз'єм постійного струму 2.1
- 4-шарове позолота

Функції NAVOC включають:

- Відтворення файлів IQ
- Мікрофонна FM-передача з CTCSS
- Декодер CTCSS

- Частотний менеджер (Збереження та завантаження з карти пам'яті з категоріями та коментарями)
- Файловий менеджер
- Програвач звукових файлів Soundboard Wave (Зберігає 8-бітні монофайли) Карта пам'яті, каталог Wav
- Приймач ADS B з видом карти
- Передавач SSTV
- Повністю налаштовувані сигнали передавача
- Передавач POCSAG
- Приймач, декодер POCSAG
- Передавач Морзе (FM-тон та CW)
- Передавачі ООК для звичайних дистанційних кодерів (PT2262, Дверні дзвінки, Віддалені розетки, Деякі гаражі)
- RDS (Система радіоданих) Передавачі PSN, радіотексту та групового зв'язку за часом
- Приймачі метеорологічних радіоеколотів для M10 та M2K2
- Приймач AFSK
- Передавач АФСК (Дзвінок202)
- Передавач синхронізації Nuoptix DTMF
- Універсальний пульт дистанційного керування TouchTunes Jukebox
- LCR (Language de Commande Routier) Генератор повідомлень
- Передавач управління вуличним освітленням (Тони CCIR)
- Прикидатися мертвим у надзвичайних ситуаціях
- Повністю налаштовуваний генератор радіочастотних сигналів

- Вихід радіо RSSI для висоти тону (для пошуку напрямку)

Особливості:

- 4-сторонні кнопки зі стрілками, колесо прокручування та кнопки вибору
- Батарейка-таблетка для збереження налаштувань, дати й часу
- Слот для мікрокартки пам'яті для зберігання даних та коду
- SSB, AM, вузькосмуговий FM, широкосмуговий FM-радіоприйом з каскадним спектром
- Високошвидкісне підключення (18 МГц) Спектральний та каскадний аналіз
- Моніторинг суден (AIS), автомобілів (TPMS), Транспондери електронних лічильників комунальних послуг (ITРОН ЕРТ)
- Для режиму запуску прошивки для використання з програмним забезпеченням хоста SDR
- Калібрує РРМ для точніших налаштувань
- Режим сну економить енергію, вимикаючи лише дисплей

2.1.5 Радіостанція Malahit DSP2 SDR Radio Firmware 2.40 Receiver 10 кГц - 2 ГГц.

Malahit-DSP2 SDR[5] , оригінальний приймач другого покоління, 10 кГц-380 МГц, 404 МГц-2 ГГц. Найновіша прошивка версії 2.40 абсолютно новий оригінальний приймач Malahit-DSP2.



Рис 1.5. Malahit DSP2 SDR

Основні параметри:

- Діапазон частот: 10 кГц-380 МГц, 404 МГц-2 ГГц.
- Ширина панорами: 192 кГц, 96 кГц, 48 кГц.
- Тип модуляції: AM, SSB, DSB, CW, NFM, WFM.
- Чутливість: 0,3 мкВ до 1 ГГц.
- Динамічна смуга пропускання: 82 дБ.
- Антена: роз'єм SMA з внутрішньою різьбою 50 Ом.
- Режим високого імпедансу (DSP2 або DSP1 з додатковою платою)
- Активна антена Bias Tee (DSP2 або DSP1 з додатковою платою)
- Джерело живлення: літій-іонний акумулятор 5000 мА*г.
- Екран: сенсорний РК-дисплей 3,5 дюйма.
- Характеристики програмного забезпечення
- Адаптивне шумозаглущення (NR)

- Порогове шумозаглушення
- Шумозаглушення (NB)
- Автоматичне регулювання підсилення (AGC)
- Автоматичний режекторний фільтр (ANF)
- Стерео FM підтримує аналогове стерео RDS
- Еквалайзер

Цей радіоприймач має широкий спектр застосування та може використовуватися на кораблях, автомобілях, електронних лічильниках комунальних послуг, для моніторингу транспондерів тощо. 3,5-дюймовий IPS ємнісний сенсорний екран.

Табл 1.1. Порівняння існуючих розробок

	Hack RF	Libre SDR	DSP SDR	Amator	Malahit
Діапазон частот	1МГц-6ГГц	70МГц-6ГГц	10МГц-2ГГц	1МГц-6ГГц	10кГц-2ГГц
Відкрітість програмного забезпечення	Повне Open Source	Часткове Open Source	Закрите	Часткове Open Source	Часткове Open Source
Програмне забезпечення	Mayhem	OC Linux	Консоль	Mayhem	Malahit DSP
Екран	RGB LCD ємнісний 3,2”	Відсутній	RGB IPS ємнісний 3,5”	RGB LCD резистивний 3,2”	RGB LCD ємнісний 3,5”
Ємність акумулятора, мА*год	2500	Відсутній	3000	2000	5000
Тривалість автономної роботи, години	1-2.5	Відсутня АКБ	1-3	1-2	2-5
Підтримка зовнішнього дисплея	Відсутня	Через Type C конвертор	Відсутня	Відсутня	Відсутня
Порти комунікації	SMA, Type C, MicoSD	SMA, Micro USB, Type C, MicroSD, Ezernet	SMA, Type C, MicoSD	SMA, Micro USB, MicoSD, AudioJack	SMA, Type C, MicoSD, AudioJack

2.2 Висновок по розділу 1

У результаті проведенного аналітичного огляду можна зробити висновок, що сучасні портативні комплекси виявлення та аналізу радіосигналів, зокрема програмно-визначувані радіостанції (SDR), є потужними, гнучкими та багатофункціональними інструментами. Їхні можливості значною мірою залежать від реалізованого апаратного забезпечення та програмного забезпечення, що дозволяє адаптувати пристрой до різноманітних сценаріїв використання — від професійного моніторингу радіочастотного спектра до наукових досліджень та аматорських проектів.

Оглянуті пристрой — Hack RF One з PortaPack H4, Libre SDR PLUTO, 1.10D DSP SDR та Amator SDR — демонструють різні підходи до реалізації SDR-рішень. Вони відрізняються функціональністю, діапазоном частот, інтеграцією інтерфейсів, типами екранів, автономністю та можливостями програмного налаштування. Зокрема, HackRF One з PortaPack H4 виділяється універсальністю і компактністю, LibreSDR — потужним обчислювальним модулем та високою пропускною здатністю, 1.10D DSP SDR — простотою використання та широким функціоналом, а Amator SDR — зручністю роботи з голосовими повідомленнями та аналізом ISM-сигналів.

Таким чином, вибір конкретного комплексу залежить від специфічних завдань користувача, технічних вимог і умов експлуатації. Загалом, розвиток SDR-технологій відкриває нові горизонти у сфері бездротових комунікацій, підвищуючи ефективність, мобільність і функціональність систем радіозв'язку.

3 Розробка АПКВАР (автоматизованого портативного комплексу)

Розробка — це комплексний процес створення нового пристрою або системи, що включає аналіз вимог, проєктування, виготовлення, тестування та впровадження. Метою розробки є отримання функціонального, надійного та ефективного продукту, який відповідає поставленим завданням і вимогам користувача.

Основні цілі розробки

- Задоволення потреб користувача: створення пристрою, який вирішує конкретні задачі, наприклад, виявлення та аналіз радіосигналів.
- Оптимізація функціональності: забезпечення максимальної ефективності роботи системи при мінімальних витратах ресурсів.
- Інтеграція сучасних технологій: використання новітніх апаратних і програмних рішень для підвищення продуктивності та зручності експлуатації.

Етапи розробки автоматизованого портативного комплексу 1. Розробка структурної схеми - Визначення основних функціональних блоків системи. - Встановлення взаємозв'язків між компонентами. - Формування загальної архітектури пристрою.

2. Підбір елементної бази

- Вибір необхідних апаратних компонентів (мікроконтролери, модулі зв'язку, накопичувачі тощо).
- Оцінка технічних характеристик та сумісності елементів.

- Формування специфікації компонентів для подальшого проєктування.

3. Розробка принципової електричної схеми

- Створення детальної електричної схеми пристрою.
- Визначення електричних з'єднань між усіма елементами.
- Перевірка коректності схеми та підготовка до виготовлення прототипу.

4. Розробка корпусу

- Визначення вимог до габаритів, ергономіки та матеріалів корпусу.
- Створення 3D-моделі корпусу з урахуванням розміщення всіх компонентів.
- Аналіз тепловідведення, захисту від пилу, вологи та механічних впливів.
- Підготовка креслень і специфікацій для виготовлення прототипу корпусу.

Значення розробки

Ретельно організований процес розробки дозволяє мінімізувати ризики, скоротити час виходу продукту на ринок і забезпечити відповідність пристрою сучасним стандартам. Для автоматизованого портативного комплексу це особливо важливо, оскільки система повинна бути надійною, мобільною, енергоефективною та зручною у використанні.

3.1 Розробка структурної схеми

Структурна схема — це графічне зображення, яке відображає основні компоненти системи та зв'язки між ними. Вона дозволяє отримати загальне уявлення про організацію елементів пристрою, їх функції та взаємодію. Завдяки такому підходу можна легко аналізувати систему, виявляти зайві або відсутні елементи, а також оптимізувати її роботу.

Структурна схема є важливою частиною документації, яка слугує ефективним засобом комунікації між розробниками, інженерами та іншими зацікавленими сторонами.

На рисунку представлена структурна схема автоматизованого портативного комплексу для виявлення та аналізу радіосигналів.

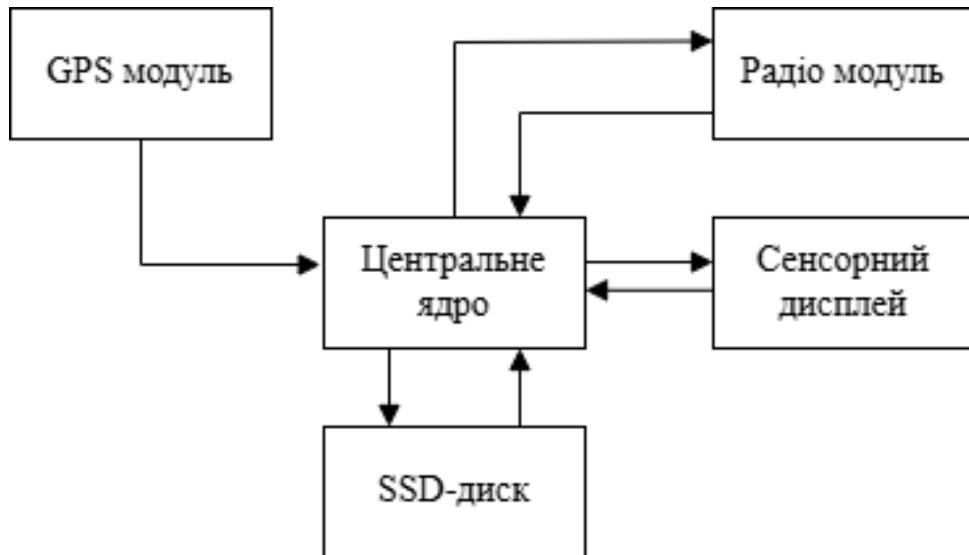


Рис 2.1.1. Структурна схема

Опис роботи системи

1. Центральний модуль:

- Виконує обчислювальні операції, обробку даних та управління всіма компонентами системи.
- Підключений до периферійних пристройів через IO Board.
- Інтегрує функції комунікаційного модуля (Wi-Fi/Bluetooth).

2. Сенсорний дисплей:

- Забезпечує інтерфейс користувача для управління системою.
- Відображає дані, отримані від інших компонентів, та дозволяє вводити команди.

3. Модуль радіо прийому передачі:

- Виконує прийом та передачу радіосигналів у діапазоні від 1 МГц до 6 ГГц.
- Передає отримані дані на центральний модуль для подальшого аналізу.

4. GPS-модуль:

- Визначає координати пристрою та передає їх до центрального модуля.
- Використовується для геопросторового аналізу та синхронізації.

5. SSD-диск:

- Використовується для зберігання операційної системи, програмного забезпечення та даних, отриманих під час роботи.

Висновок по розділу 2.1

Структурна схема дозволяє зрозуміти загальну організацію системи, її функціональні можливості та взаємодію компонентів. Вона є основою для

подальшого проектування, тестування та впровадження автоматизованого портативного комплексу.

3.2 Підбір елементної бази

Підбір елементної бази — це ключовий етап у розробці будь-якого електронного пристрою, особливо якщо йдеться про складні багатофункціональні системи, такі як польовий планшет для збору, обробки та передачі даних. Від правильного вибору компонентів залежить не лише функціональність, а й надійність, енергоефективність, масштабованість і вартість кінцевого виробу.

Головна мета — забезпечити оптимальне поєднання апаратних компонентів, які відповідають вимогам проекту за такими критеріями:

- Функціональність: кожен елемент повинен виконувати свою роль (наприклад, прийом радіосигналу, обробка даних, зберігання інформації, відображення результатів, автономне живлення тощо).
- Сумісність: компоненти мають бути електрично та програмно сумісними між собою, щоб забезпечити стабільну роботу системи.
- Енергоефективність: важливо мінімізувати споживання енергії, особливо для портативних і автономних пристрійв.
- Масштабованість і гнучкість: можливість розширення функціоналу або заміни окремих модулів без повної переробки пристрою.
- Надійність і довговічність: вибір перевірених рішень із хорошою репутацією та підтримкою.
- Вартість і доступність: компоненти повинні бути доступними на ринку, а їх ціна — відповідати бюджету проекту.

Етапи підбору елементної бази:

1. Аналіз вимог: визначення основних задач пристрою (наприклад, прийом і аналіз радіосигналів, GPS-навігація, відеозахоплення, зберігання даних, відображення інформації, автономна робота).
2. Вибір ключових модулів: підбір основних функціональних блоків (SDR-приймач, центральний процесор, GPS-модуль, накопичувач, дисплей, акумулятор, материнська плата).
3. Порівняння альтернатив: аналіз переваг і недоліків різних варіантів кожного модуля з урахуванням технічних характеристик, сумісності, ціни, підтримки та наявності.
4. Інтеграція: перевірка можливості спільної роботи обраних компонентів, оцінка потреб у додаткових адаптерах, платах розширення, драйверах тощо.
5. Прототипування: складання тестового зразка для перевірки працездатності всієї системи.
6. Оптимізація: за необхідності — заміна або доопрацювання окремих елементів для досягнення кращих показників.

Грамотний підбір елементної бази дозволяє:

- Забезпечити стабільну та ефективну роботу пристрою в реальних умовах експлуатації.
- Мінімізувати ризики виникнення апаратних і програмних проблем.
- Спростити подальше обслуговування, ремонт і модернізацію.
- Досягти балансу між продуктивністю, автономністю, розмірами та вартістю.
- Гарантувати масштабованість і адаптивність системи під нові задачі.

У цьому розділі детально розглядаються всі основні компоненти, їхні характеристики, переваги та недоліки, а також обґруntовується вибір

кожного елемента для конкретного застосування. Такий підхід дозволяє створити оптимальну апаратну платформу для реалізації поставлених функціональних і експлуатаційних вимог.

3.2.1 Антени

Антени — це ключовий елемент системи прийому та передачі радіосигналів, оскільки саме вони забезпечують ефективний зв'язок пристрою з навколишнім радіочастотним середовищем. У контексті польового планшета для збору, обробки та передачі даних антени виконують такі основні функції:

- Прийом радіосигналів: антена вловлює електромагнітні хвилі з ефіру та перетворює їх на електричний сигнал, який далі обробляється SDR-приймачем або іншим радіомодулем. Якість прийому залежить від типу антени, її розміру, налаштування та відповідності робочому діапазону частот.
- Передача радіосигналів: при необхідності антена випромінює сформований електричний сигнал у вигляді радіохвиль, забезпечуючи зв'язок із зовнішніми пристроями, мережами або іншими системами.
- Забезпечення оптимальної роботи SDR: для широкосмугових SDR-приймачів важливо мати антenu, яка покриває необхідний частотний діапазон і має відповідну діаграму спрямованості (всенаправлену чи спрямовану — залежно від задачі).
- Гнучкість і масштабованість: можливість підключення різних типів антен дозволяє адаптувати пристрій під різні сценарії використання — від

моніторингу широкого спектра до точкового прийому слабких або далеких сигналів.

- Зниження рівня шуму та перешкод: правильно підібрана антена зменшує вплив зовнішніх завад, підвищує чутливість системи та покращує якість прийому.

У польових умовах особливо важливо враховувати компактність, міцність, простоту монтажу та можливість швидкої заміни або налаштування антени під конкретні задачі. Вибір типу антени (телескопічна, дипольна, дискон, спрямована, петльова тощо) визначається робочим діапазоном частот, вимогами до дальності зв'язку, рівнем сигналу та специфікою застосування (моніторинг, аналіз, передача даних, геолокація тощо).

Таким чином, антена є невід'ємною частиною апаратної платформи, що безпосередньо впливає на ефективність і функціональність пристрою для прийому та передачі радіосигналів.

Види антен[6]:

1. Телескопічна антена (Whip Antenna) Частотний діапазон: ~30 МГц – 1 ГГц (залежно від довжини) Переваги: регульована довжина, компактність Недоліки: погано працює на частотах нижче 20 МГц або вище 1 ГГц Ідеальна для загального моніторингу, прослуховування FM-радіо, авіадіапазону тощо.
2. Дипольна антена Частотний діапазон: залежить від довжини плечей (резонансна) Переваги: хороша ефективність на налаштовану частоту

Недоліки: потребує місця для встановлення, вузькосмугова Підходить для прийому короткохвильових (HF) та деяких VHF сигналів.

3. Антена Discone Частотний діапазон: ~25 МГц – 1.3 ГГц Переваги: надширокий діапазон, всенаправлена Недоліки: габаритна, складна у транспортуванні Популярна для загального спектрального аналізу або моніторингу кількох діапазонів.
4. Спрямовані антени (Yagi, Log-periodic) Частотний діапазон: залежить від конструкції Переваги: велике підсилення, вузька діаграма направленості Недоліки: потрібно точно наводити, габарити Використовується для направленого прийому, наприклад, супутниковых або цифрових наземних сигналів.
5. Петльова антена (Loop Antenna) Частотний діапазон: від LW до HF Переваги: низький рівень шуму, малий розмір Недоліки: вузькосмугова, потребує підстроювання Чудово підходить для прийому слабких сигналів у діапазоні коротких хвиль.
6. Антена типу “вухо кролика” (Rabbit Ears) Частотний діапазон: 50 – 800 МГц Переваги: дешева, проста Недоліки: неефективна поза телевізійними діапазонами Може використовуватись для прийому DVB-T, FM або експериментів.

3.2.2 Пристрій захоплення радіосигналу

1. HackRF-One

HackRF-One[7] — це програмоване радіо, що дозволяє працювати з широким діапазоном частот (від 1 MHz до 6 GHz). Цей пристрій є потужним

інструментом для досліджень і застосувань у бездротових комунікаціях, криптографії, виявленні та аналізі радіосигналів.



Рис 2.2.1. HackRF-One

Переваги:

- Широкий діапазон частот: підтримка від 1 MHz до 6 GHz дозволяє працювати з практично всіма радіочастотними спектрами.
- Програмування: можливість налаштовувати частоти і параметри роботи за допомогою відкритого програмного забезпечення.
- Мобільність: HackRF-One має компактний розмір, що дозволяє використовувати його у польових умовах.

Недоліки:

- Потребує спеціалізованих знань: використання потребує знань у галузі радіоелектроніки та програмування.
- Обмежена потужність: HackRF-One не підходить для високоякісних і далекобійних передавальних пристройів.

2. RTL-SDR v3

RTL-SDR[8] — це недорогий USB-приймач SDR, побудований на базі RTL2832U.Хоча він не підтримує передавання сигналів, його можна використовувати для широкого спектру задач моніторингу — від аналізу спектру до прийому супутниковых або авіаційних сигналів.



Рис 2.2.2. RTL-SDR v3

Переваги:

- Дуже низька вартість — ідеально підходить для початківців.
- Покриває частоти від 500 kHz (через модифікацію) до 1.7 GHz.
- Працює з популярними програмами, такими як SDR#, GQRX, GNURadio.

Недоліки:

- Тільки приймач — неможливо передавати сигнали.
- Вужчий діапазон частот порівняно з HackRF.
- Нижча точність та динамічний діапазон.

3. LimeSDR Mini v2

LimeSDR Mini[9] — це компактний SDR із повною підтримкою прийому та передачі сигналів. Працює в діапазоні від 10 MHz до 3.5 GHz та підтримує USB 3.0 для високої швидкості передачі даних. Відмінно підходить для мобільних проектів з аналізу та трансляції сигналів.



Рис 2.2.3. LimeSDR Mini

Переваги:

- Повноцінна підтримка TX/RX.
- Вища якість сигналу, ніж у HackRF, особливо при цифровій модуляції.
- Відкрите ПЗ та активна спільнота.

Недоліки:

- Вужчий частотний діапазон: до 3.5 GHz проти 6 GHz у HackRF-One.
- Дорожчий, ніж RTL-SDR, і трохи складніший у використанні.

4. ADALM-Pluto (PlutoSDR)[10]

PlutoSDR від Analog Devices — це потужна SDR-платформа з підтримкою прийому і передачі в діапазоні 325 MHz – 3.8 GHz (можна розширити до 70 MHz – 6 GHz через прошивку). Використовується в освітніх та наукових цілях, з дуже якісною документацією та підтримкою від виробника.



Рис 2.2.4. ADALM-Pluto

Переваги:

- Надійна апаратна реалізація від Analog Devices.
- TX/RX з хорошим рівнем чистоти спектру.
- Можливість розширення частотного діапазону програмно.

Недоліки:

- Складніше у налаштуванні для новачків.

- Менш компактний форм-фактор, ніж у HackRF-One.
5. BladeRF 2.0 micro xA4 SDR трансівер 47 МГц-6 ГГц 49 КЛІС

BladeRF 2.0 micro xA4[11] програмно-визначене радіо (SDR) нового покоління з частотним діапазоном від 47 МГц до 6 ГГц, 2×2 MIMO, ПЛІС із 49К логічних елементів.



Рис 2.2.5. BladeRF 2.0 micro xA4 SD

bladeRF 2.0 micro xA4 – це програмно-визначене радіо (SDR) нового покоління з частотним діапазоном від 47 до 6 ГГц, частотою дискретизації 61,44 МГц (з можливістю збільшення до 122,88 МГц) та потоковою передачею 2×2 MIMO. Будучи упакованим у невеликий форм-фактор, bladeRF 2.0 micro був розроблений для високопродуктивних та мобільних додатків. Завдяки libbladeRF bladeRF 2.0 micro сумісний з GNURadio, GQRX, SDR-Radio, SDR#, gr-fosphor, SoapySDR і т.д. під Windows, Linux та MacOS.

Екрануючий кожух захищає чутливі радіочастотні компоненти від електромагнітних перешкод (EMI) та забезпечує додаткове тепловідведення, дозволяючи bladeRF 2.0 micro працювати у складних умовах.

Всі радіочастотні SMA-порти здатні забезпечити живлення широкосмугових та попередніх підсилювачів за схемою струмового

інжектора. Живлення периферійних пристройів струмовим інжектором управляється програмно, що забезпечує максимальну експлуатаційну гнучкість.

В основі мікросхеми bladeRF 2.0 лежить ПЛІС останнього покоління Cyclone V від Intel (раніше Altera). xA4 використовується ПЛІС, що містить 49 логічних елементів.

Удосконалений тактовий генератор

Удосконалена архітектура синхронізації дозволяє bladeRF 2.0 micro приймати від інших пристройів та передавати сигнал тактового генератора з частотою 38,4 МГц. Крім того, вбудована схема ФАПЧ дозволяє мікроконтролеру bladeRF 2.0 синхронізувати вбудований тактовий генератор із зовнішнім сигналом опорної частоти 10 МГц. У моделі xA4 використовують високоточний, стабільний тактовий генератор. Вбудований ЦАП управляє регулюванням підстроювання частоти генератора для заводського калібрування.

Ланцюги живлення модуля bladeRF 2.0 micro є складною комбінацією малошумливих і високоефективних імпульсних і лінійних регуляторів потужності. Хоча bladeRF 2.0 micro може живитися виключно від USB шини, для забезпечення максимальної лінійності периферійних пристройів, що живляться через інжектор, необхідно підключити зовнішнє джерело живлення. Ланцюги живлення мають схему автоматичного перемикання для оптимізації споживання потужності між шиною USB та зовнішнім постійним живленням.

Модуль bladeRF 2.0 micro може працювати в некерованому автономному режимі, не вимагаючи підключення до зовнішнього контролера або комп’ютера. Об’єм вбудованої флеш-пам’яті досить великий, щоб вмістити образ ПЛІС будь-якого розміру xA4.

Можливості та функції

- РЧ-ХАРАКТЕРИСТИКИ:
 - Діапазон частот: від 47 МГц до 6 ГГц
 - 2×2 MIMO
 - Частота дискретизації: 61,44 МГц
 - Ширина смуги ПЧ: до 56 МГц
 - Автоматичне регулювання посилення (АРП)
 - Автоматична корекція IQ та зміщення по постійному струму
- ПІДТРИМКА СВЕРХХІДНОГО ІНТЕРФЕЙСУ USB 3.0:
 - Процесор ARM926EJ-S із частотою 200 МГц
 - Повністю живиться по шині USB 3.0
 - Зовнішнє живлення 5 В постійного струму з автоматичним перемиканням
- ПЛІС ALTERA CYCLONE V FPGA:
 - 49 кЛЕ для користувальницької обробки сигналів та апаратних прискорювачів
- VCTCХО ІЗ ЗАВОДСЬКИМ КАЛІБРУВАННЯМ:
 - Управління ланцюгом ФАПЧ 12-роздрядним ЦАП
 - Заводське калібрування тактової частоти 38,4 МГц

Висновок

BladeRF 2.0 micro xA4 — це найкращий вибір для пристрою захоплення радіосигналу завдяки поєднанню широкого частотного діапазону (47 МГц – 6 ГГц), підтримки повноцінного прийому та передачі (2×2 MIMO), високої якості сигналу та сучасної елементної бази (FPGA Cyclone V, USB 3.0). BladeRF забезпечує більшу гнучкість у налаштуванні, стабільну роботу навіть у складних умовах, а також підтримку професійних інтерфейсів і програмного забезпечення (GNURadio, SDR#, SoapySDR тощо). Завдяки екрануванню, можливості автономної роботи, розширеним функціям живлення та високій точності синхронізації, bladeRF 2.0 micro xA4 ідеально підходить для мобільних і польових рішень, де важливі надійність, продуктивність і масштабованість. У порівнянні з іншими SDR-пристроїми, він пропонує оптимальний баланс між функціональністю, якістю та можливістю розширення, що робить його найкращим вибором для даного проекту.

3.2.3 Центральне ядро обчислень

1. Raspberry Pi Compute Module 5

Raspberry Pi Compute Module 5 (CM5)[12] — це компактний та потужний комп’ютер на базі процесора Broadcom BCM2711, який використовується в різноманітних вбудованих системах. Це основний компонент, який виконує обчислювальні операції у проекті. CM4 пропонує широку гнучкість завдяки варіативності в обсягах пам’яті (від 1 ГБ до 8 ГБ) і можливості додаткового зберігання через eMMC або microSD картки.



Рис 2.2.6. Raspberry Pi Compute Module 5

Переваги:

- Висока потужність: чотириядерний процесор Cortex-A72 дозволяє запускати інтенсивні додатки, зокрема обробку відео та даних у реальному часі.
- Гнучкість: доступні варіанти з різними об'ємами пам'яті та зберігання.
- Широка підтримка периферії: можливість підключення різноманітних пристрійв через GPIO, HDMI, USB, Ethernet, а також підтримка стандартних Raspberry Pi HAT.
- Підтримка бездротового зв'язку: вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth дозволяють організувати мобільний зв'язок і передачу даних без дротів.

Недоліки:

- Високі вимоги до живлення: потребує постійного підключення до джерела живлення, що може бути проблемою в автономних рішеннях.
- Відсутність вбудованого монітора: необхідно підключати зовнішній дисплей.

- Обмеження за типами зберігання: відсутність стандартного жорсткого диска обмежує швидкість зберігання даних при великих об'ємах.
2. NVIDIA Jetson Nano

NVIDIA Jetson Nano[13] — це мікрокомп'ютер, орієнтований на проекти, що потребують обробки даних з використанням штучного інтелекту (AI). Він оснащений чотириядерним ARM Cortex-A57 процесором та графічним процесором NVIDIA Maxwell із 128 ядрами CUDA, що робить його ідеальним для задач комп'ютерного зору, машинного навчання та автономних систем.



Рис 2.2.7. NVIDIA Jetson Nano

Переваги:

- Потужний GPU: підтримує глибоке навчання, AI, відеоаналітику в реальному часі.
- Висока продуктивність у AI-заданнях: оптимізований під TensorFlow, PyTorch, OpenCV.
- Підтримка дисплеїв через HDMI та MIPI DSI, а також камер через CSI.

Недоліки:

- Високе енергоспоживання, що не ідеально для автономних рішень.
- Обмежена спільнота у порівнянні з Raspberry Pi.
- Потребує активного охолодження при тривалому навантаженні.

3. Radxa CM3

Radxa CM3[14] — це сумісний за розмірами модуль з Raspberry Pi CM4, але базується на SoC Rockchip RK3566 (4x Cortex-A55 до 2.0 ГГц) і орієнтований на вбудовані та мультимедійні рішення. Він підтримує до 8 ГБ LPDDR4 RAM і до 128 ГБ eMMC.



Рис 2.2.8. Radxa CM3

Переваги:

- Висока енергоефективність: Cortex-A55 забезпечує хорошу продуктивність при низькому споживанні енергії.
- Розширені можливості відео: підтримка 4K відео, кодеків H.265/H.264.
- Повна сумісність по роз'єму з Raspberry Pi CM4.

Недоліки:

- Менш розвинена екосистема (менше доступного ПЗ, менше підтримки спільноти).
- Підтримка Linux дещо обмежена в порівнянні з Raspberry Pi OS.
- Немає вбудованого Wi-Fi/Bluetooth у базовій конфігурації.

Висновок

Попри наявність конкурентів, Raspberry Pi Compute Module 5 залишається найкращим вибором для через баланс між продуктивністю, гнучкістю, широкою підтримкою та стабільністю. Його багаторічна репутація, величезна спільнота користувачів, сумісність з великою кількістю периферійних модулів і чудова документація роблять його ідеальним ядром для проектів, де важливі стабільність, підтримка і масштабованість.

3.2.4 Пристрій GPS

1. GPS модуль NEO-6M v2

GPS модуль u-blox NEO-6M[18] забезпечує точне визначення географічних координат і може використовуватися для синхронізації часу або визначення місця розташування. Він є важливим компонентом для проектів, де необхідно точно визначати позицію детекованого сигналу, наприклад, у системах моніторингу або геолокації.



Рис 2.2.12. GPS модуль NEO-6M v2

Переваги:

- Висока точність: забезпечує точність до кількох метрів, що ідеально підходить для геолокаційних задач.
- Швидкий старт: підтримує функцію швидкого холодного та гарячого старту для швидкого визначення координат.
- Низьке енергоспоживання: оптимізований для роботи в енергоекспективних системах.
- Широка сумісність: підтримує стандартні інтерфейси UART і I2C, що дозволяє легко інтегрувати модуль у різні системи.

Недоліки:

- Залежність від сигналу: потребує відкритого доступу до неба для отримання точних координат.
- Додаткові антени: для покращення прийому сигналу може знадобитися зовнішня антена.

2. u-blox NEO-M8N

NEO-M8N — більш сучасна модель від u-blox з розширеною функціональністю. Підтримує одразу декілька навігаційних систем (GPS, GLONASS, Galileo), що значно підвищує точність і надійність у складних умовах.

Переваги:

- Підтримка кількох GNSS систем.
- Вища точність і стабільність у міських або лісистих місцевостях.
- Висока швидкість оновлення (до 10 Гц).

Недоліки:

- Вища ціна.
- Потребує якіснішої антени для досягнення повної продуктивності.

3. Quectel L86 GPS/GNSS модуль

L86 — компактний GNSS модуль із вбудованою патч-антеною. Підтримує GPS, QZSS і SBAS. Має вбудовану флеш-пам'ять для збереження даних та швидкого старту.

Переваги:

- Надзвичайно компактний форм-фактор.
- Вбудована антена — не потребує зовнішньої (але можна підключити).
- Підтримка AGPS (завантаження ефемерид через інтернет).

Недоліки:

- Нижча чутливість у порівнянні з модулями з повноцінною антеною.
- Вужчий діапазон GNSS протоколів, ніж у M8N.

Висновок

NEO-6M v2 — це перевірене, надійне та доступне рішення для проектів, де важлива точність позиціювання та простота інтеграції. Він має відкриту документацію, велику спільноту підтримки, добре працює з Raspberry Pi, Arduino і STM32, а також легко підключається до зовнішньої активної антени. На відміну від новіших моделей (M8N, L86), NEO-6M не потребує додаткового програмного налаштування, що робить його найкращим варіантом для прототипів і польових DIY-рішень із фокусом на стабільну роботу та простоту.

3.2.5 Пристрій збереження даних

1. SSD диск Transcend MTS420S 240GB M.2 2242 SATAIII 3D NAND TLC

SSD MTS420S[19] диск забезпечує високу швидкість читання та запису завдяки використанню 3D NAND технології та інтерфейсу SATAIII. Ідеальний для зберігання операційної системи, даних та програм у вашому пристрой.

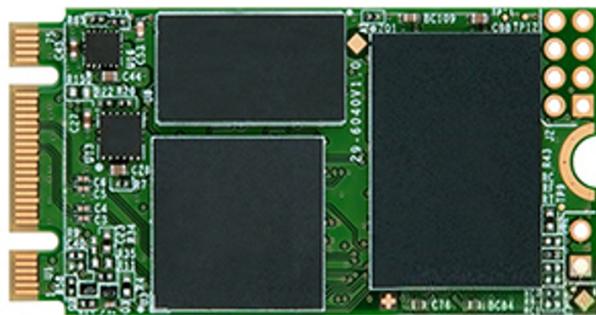


Рис 2.2.13. SSD диск Transcend MTS420S

Переваги:

- Висока швидкість: забезпечує швидке завантаження та збереження даних.
- Надійність: 3D NAND пам'ять є більш стійкою до зносу, ніж традиційна 2D NAND.
- Енергоекспективність: знижене споживання енергії в порівнянні з механічними жорсткими дисками.

Недоліки:

- Ціна: хоча ціни на SSD знижуються, вони все ще дорожчі, ніж звичайні жорсткі диски.
- Обмежена ємність: хоча 240 ГБ — достатньо для стандартних задач, для великих даних знадобиться диск більшої ємності.

2. KingSpec M.2 2242 SATAIII 256GB

KingSpec — китайський виробник SSD-дисків, який пропонує бюджетні рішення з форм-фактором M.2 2242. Цей SSD має інтерфейс SATAIII і базується на TLC NAND, що забезпечує швидкий доступ до даних.

Переваги:

- Вигідна ціна.
- Продуктивність на рівні більшості SATAIII SSD.
- Широка доступність на AliExpress та локальних ринках.

Недоліки:

- Менша надійність і тривалість служби у порівнянні з брендовими рішеннями.
- Часті варіації якості між партіями.

3. ADATA SU650 M.2 2280 SATAIII 240GB

ADATA — відомий виробник із більш стабільною якістю продукції. SU650 — це SATA SSD, який має трохи більший форм-фактор (2280), але може використовуватись у 2242 слотах із адаптером або вільним місцем на платі.

Переваги:

- Стабільна якість і хороша підтримка бренду.
- Надійність в роботі навіть при підвищених навантаженнях.
- Добре підходить для Linux- або Android-платформ.

Недоліки:

- Форм-фактор 2280 — не підходить для компактних систем без адаптера.
- Немає високих швидкостей як у NVMe SSD.

Висновок

Transcend MTS420S забезпечує ідеальний баланс розміру (22x2), швидкості, енергоефективності та надійності. У порівнянні з KingSpec, він має значно вищу якість збірки і стабільність роботи, а на відміну від рішень формату 2280 (як ADATA SU650), легко інтегрується в компактні проекти, зокрема планшети. Крім того, підтримка 3D NAND TLC гарантує довший термін служби без шкоди для продуктивності. Це робить Transcend MTS420S найкращим вибором для польових і DIY-рішень, де важливі компактність, надійність та витривалість.

3.2.6 Дисплей

1. Сенсорний дисплей IBM Lenovo Wacom 12.1in XGA LCD Touch Screen

IBM Lenovo Wacom 12.1in[20] цей сенсорний дисплей має XGA роздільну здатність (1024x768 пікселів) і підтримує технологію стилусного введення. Його можна використовувати для розробки інтерфейсів користувача, де необхідний високий рівень точності введення. Використання стилуса дозволяє отримати більш точні результати, що важливо в польових умовах або при роботі з картами та іншими детальними графіками.



Рис 2.2.14. IBM Lenovo Wacom 12.1in XGA LCD Touch Screen

Переваги:

- Сенсорне введення: підтримує ввід як пальцем, так і стилусом, що є важливим для інтерактивних додатків.
- Висока точність: точність введення за допомогою стилуса дозволяє використовувати дисплей у складних робочих умовах.
- Компактність і зручність: зручний розмір для портативних рішень.

Недоліки:

- Малий розмір екрана: може бути недостатньо великим для відображення складних графічних інтерфейсів.
- Вартість: дисплей високої якості може бути дорожчим порівняно з іншими дисплеями.

2. Waveshare 10.1" HDMI LCD with Capacitive Touch

Waveshare 10.1"[21] це 10.1-дюймовий дисплей із роздільною здатністю 1280x800 пікселів підтримує ємнісне сенсорне введення до 10 дотиків

одночасно. Він підключається через HDMI для відео і через USB для сенсорного інтерфейсу, що робить його простим у використанні з Raspberry Pi Compute Module 4.

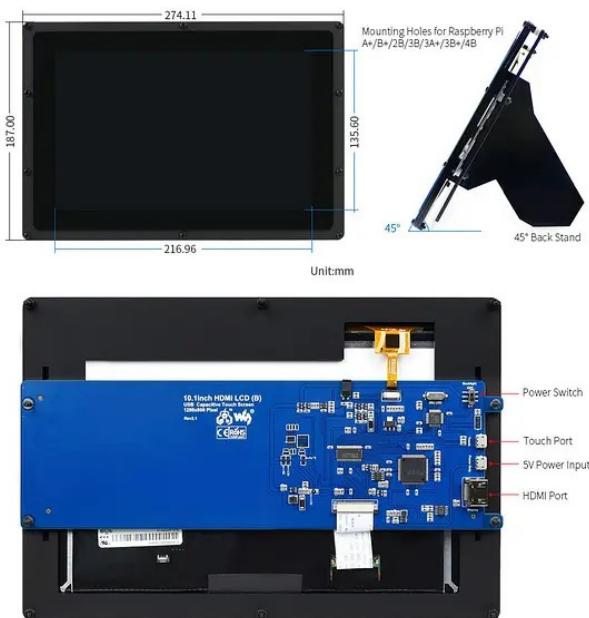


Рис 2.2.15. Waveshare 10.1 HDMI LCD

Переваги:

- Вища роздільна здатність, ніж XGA — зручніше для сучасних UI.
- Емнісний multitouch: підтримка до 10 торкань, плавна взаємодія.
- Просте підключення (HDMI + USB), без складного налаштування драйверів.

Недоліки:

- Не підтримує стилус з точністю Wacom.

- Не має MIPI-інтерфейсу — потребує HDMI, що не завжди зручно в планшетах.

3. Official Raspberry Pi 7" Touchscreen Display

RPi 7" Touchscreen Display[22] має роздільну здатність 800x480 та підтримує ємнісний multitouch. Підключається через DSI-інтерфейс, тому не займає HDMI-порт, що критично у компактних системах.



Рис 2.2.16. Raspberry Pi 7 Touchscreen

Переваги:

- DSI-підключення: не займає HDMI, що залишає порт для додаткового дисплея або інших задач.
- Компактний: ідеально підходить для невеликих корпусів планшету.
- Хороша інтеграція з Raspberry Pi: драйвери та підтримка з коробки.

Недоліки:

- Низька роздільна здатність (800x480) — обмеження при роботі з великими UI.
- Малий розмір — не завжди зручно для складних інтерфейсів.

Висновок

Цей дисплей виділяється завдяки підтримці активного стилуса з технологією Wacom, що забезпечує високу точність введення, критичну для військових або інженерних додатків, картографії та роботи в складних умовах. Його співвідношення сторін (4:3) зручно для читання технічної документації та створення інтерфейсів, орієнтованих на точність, а не на розваги. Крім того, його корпус і призначення дозволяють використовувати дисплей у надійних польових рішеннях, що робить його кращим варіантом серед альтернатив.

3.2.7 Батарея

Літій-іонні (Li-ion) елементи та зібрани із них акумуляторні батареї (АБ) за останні роки повністю довели свою ефективність використання у різноманітних галузях людського виробництва техніки та майже замінили кислотні (КБ) і лужні (ЛБ) батареї, котрі використовувалися раніше. А деякі виробництва пристройів загалом неможливі без новітніх Li-ion джерел струму. Так більшість переносних засобів комунікації (смартфонів), портативних комп'ютерів (ноутбуків, планшетів), засобів руху (моноколіс, GyroScooter, Hoverboard, е-байків), різноманітних побутових та складських роботів (роботів-пилосмоків, роботів для миття вікон), різних портативних та виробничих електростанцій (powerbank, UPS, сонячних станцій) та інших сучасних гаджетів обов'язково створені на основі Li-ion АБ.

Переваги такої технології виробництва над технологіями свинцево-кислотних та лужних (alkaline) хімічних елементів живлення сьогодні стали

нормою і базою для створення сучасної техніки у світі. Необхідно відзначити найбільш важомі особливості Li-ion джерел живлення:

- Щільність енергії на одиницю маси та об'єму — розміри елементів і АБ у 2–4 рази менші.
- Швидка перезарядка від 0 до 100% за 1–2 години, що дає більш ефективно використовувати пристрой на Li-ion живленні.
- Циклічність заряду/роздряду від 1000 до 8000 разів, що дозволяє експлуатувати батареї у декілька разів довше: від 5 до 25 років.
- Низький саморозряд — енергія у таких батареях зберігається у декілька разів довше без експлуатації.
- Екологічність — відсутність у будові токсичних металів (кадмій, свинець, ртуть) згідно сучасних екологічних стандартів.

Принцип роботи

Основа конструкції Li-ion елементів — анод, виготовлений з вуглецю пористого на мідній фользі, і катод, виконаний з оксиду літію на алюмінієвій фользі. Розділювачем виступає пористий поліпропіленовий сепаратор, який просочений електролітом, що виконує роль провідника. Всі елементи укладені в герметичний корпус. Електроди підключаються до струмознімачів. У деяких моделях передбачений клапан, який відповідає за скидання тиску всередині конструкції.

Мідні та алюмінієві пластини, змащені електролітом та розділені пористим шаром, згорнуті у рулон. Корпус набуває циліндричної форми. Якщо пластини укладені по-іншому, елемент чи батарея мають форму призм та пакетиків. Моделі різняться складом катода. Незалежно від матеріалу, що в

ньому використовується, принцип дії літієвих акумуляторів одинаковий для агрегатів усіх видів. Під час подачі напруги на електроди позитивно заряджені іони літію від'єднуються від молекул оксиду та переміщуються на вуглецеву пластину. Це призводить до окисної реакції та заряду батареї. Коли Li-ion працює під навантаженням, спостерігається зворотна дія — іони Li⁺ переходят на пластину з оксиду літію у звичайне положення.

Літієві джерела живлення чутливі до перезаряду. Надмірний заряд призводить до нагромадження металевого літію на поверхні анода. Цей осад може розпочинати реакцію з електролітом. При цьому на катоді починає активно виділятися кисень, про що свідчить інтенсивне нагрівання, підвищення тиску та можлива розгерметизація АКБ.

Заряджання елементів та батареї проходить у два етапи:

1. **Перший** — здійснюється при стабільному струмі 0,2С–1С до напруги 4,2 В і займає приблизно 40 хвилин.
2. **Другий** — виконується при незмінній напрузі. Заряджання завершується, коли зарядний струм знижується до значення, що становить 3% від номінального.

Щоб літієва батарея прослужила довго, її необхідно заряджати струмом, що становить 50% від ємності (0,5С).

Згодом АКБ Li-ion «старієть», усередині накопичуються продукти окислення, втрачається частина ємності. Економічно доцільно життєвий цикл акумулятора завершити, коли він втрачає 30% вихідної ємності. Ресурс моделей у середньому становить 1000 зарядів та розрядів. Щоб продовжити

термін експлуатації, рекомендується не перевищувати оптимальний струм заряду 0,5С (50% номінальної ємності пристрою). Також важливо уникати глибокого розряду та перезаряду АКБ, виключити переохолодження та перегрів, не зберігати розрядженим протягом тривалого часу.

Типи та різновиди

Типи літій-іонних акумуляторів[24] мають багато різних варіацій із різними елементами у складі катода. У деяких модифікаціях в аноді може повністю або частково замінюватись графіт.

- **Літій-кобальтові (LiCo)**

Такі елементи і батареї призначаються для живлення високотехнологічних гаджетів завдяки високій питомій енергоємності. Їх встановлюють у смартфони, лептопи, цифрові фотоапарати тощо.

Літій-кобальтові осередки оснащаються спеціальним захистом, необхідним для обмеження заряду та швидкості розряду до безпечного рівня.

Недоліки LiCoO₂: порівняно невеликий термін служби, низька термічна стабільність та лімітована кількість циклів.

- **Літій-марганцеві (LiMn)**

Низький опір гарантує можливість швидкої зарядки та дозволяє витримувати протягом кількох секунд імпульси до 50А. Гнучка конструкція дає можливість адаптувати властивості АКБ під різні завдання, покращуючи її характеристики. Літій-марганцеві моделі використовуються для

електроінструментів з високою потужністю, медичної техніки, а також електричного та гібридного транспорту.

- Літій-полімерні (Li-Pol, Li-polymer, Li-Po)

Пристрої можуть виготовлятися майже у будь-якій формі та конфігурації. У приладів низький рівень саморозряду, слабкий ефект пам'яті та висока ємність.

Недолік моделей – електричні параметри помітно погіршуються за умов низької температури (можлива кристалізація полімеру).

Акумулятори Li-polymer випускаються у двох варіантах — стандартні та швидкорозрядні. Вони відрізняються максимальним струмом розряду: для стандартних моделей показник становить трохи більше 3C, у швидкорозрядних може досягати 10C. Ці пристрої ефективніше працюють при інтенсивній експлуатації у частих циклах розряду-заряду. Їх встановлюють у мобільну техніку (смартфони, електронні книги, планшети), радіокеровані апарати, портативні електроінструменти, деякі електромобілі.

- Літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄)[25]

Вони стійкі до критичних температур (від -30 до +50 °C), тому їх можна використовувати поза приміщеннями. Ці елементи живлення безпечні в експлуатації: не спалахують і не вибухають від перенапруги. Пристрої стійкі до перезарядки та перепадів в електромережі. Витримують піковий розрядний струм до 25C і тривалий вплив високої напруги. За місяць саморозряджаються лише на 1,5%. Прилади довговічні: робочий цикл — 2000, термін зберігання — до 15 років. Завдяки стабільності ферофосфатні

моделі підтримують прискорену зарядку великими струмами. Їх заряджають спеціальними зарядними адаптерами, котрі несумісні з іншими типами акумуляторів. З недоліків: відносно більша вага, розміри та ціна. Зберігати прилади необхідно за заряду 40–60%. Заповнити запас енергії до 80% можна приблизно за 1,5 години.

Літій-залізо-фосфатні батареї випускаються у формі паралелепіпеда, циліндра та плоского корпусу. Їх використовують для вітрогенераторів, сонячних панелей, водного та електричного транспорту, складської техніки, ігрового обладнання тощо. Вони не бояться довгих періодів простою. До кінця експлуатаційного терміну втрачають до 20% ємності.

- **Літій-титанатні (LTO)**

Акумулятор LTO нормально працює при морозі. За рахунок відсутності вуглецю у складі виключається перегрів. Знижена напруга комірки робить АКБ безпечною у використанні. У моделях немає ефекту пам'яті. Недоліком LTO є невелика щільність енергії (від 30 до 110 Вт·год/кг), пов'язана з низькою напругою 2,4 В.

Літій-титанатні акумулятори використовуються як основне джерело живлення в електротранспорті, а також у бензинових машинах як заміна АКБ для стартера, автозвуку та освітлення. Також їх встановлюють у побутовій техніці, медичному та телекомунікаційному обладнанні. За допомогою LTO організовують внутрішнє та зовнішнє освітлення на базі сонячних панелей.

- **Літій-нікель-марганець-кобальт-оксидні (Li-NMC, NMC)**

Ефективність пристройів забезпечується вдалим поєднанням марганцю та нікелю. Перший елемент має шпинельну структуру, але високий внутрішній опір, що знижує енергоємність. Другий — нестабільний, але енергоємний. Водночас ці матеріали компенсують недоліки один одного, посилюючи переваги. Основні плюси: хімічна стабільність, високий рівень струмовіддачі, мінімальні показники саморозряду, легка переносимість глибокої розрядки, стійкість до температурних перепадів. Пристрої не схильні до спалахів, що робить їх відмінним варіантом для використання як UPS. Проте основна сфера експлуатації — електротранспорт.

Підсумовуючи всі вищевказані особливості різних Li-ion елементів, їх можна звести у таблицю для наочності та легшого порівняння переваг і недоліків. (У таблицю не внесено максимальну ємність АБ, оскільки технологія Li-ion дозволяє виготовляти потужні джерела енергії шляхом з'єднання елементів послідовно або паралельно. Тому максимальна ємність АБ залежить від багатьох технологічних складників: параметрів певних елементів, їх кількості у складі батареї, способу експлуатації тощо.)

Табл 2.2.1. Загальні характеристики Li-ion елементів живлення

	LiCo	LiMn	Li-Pol	LiFePO4	LTO	Li-NMC
Напруга елемента, В	3,6	3,7	3,7	3,2	2,4	3,6–3,7
Циклічний ресурс, тисяч раз	0,7-1	1-2	8-9	1-2	5-8	1-2
Допустима глибина розряду, %	100	100	100	100	100	100
Діапазон робочих температур, °C	-10...+60	-10...+45	-20...+40	-10...+60	-10...+45	-10...+55
Термін служби, років	5–7	10	до 8	20–25	18–25	10
Граничний струм заряду	0,7-1C	0,7-1C	1C	25-30C	10C/30C	0,7-1C
Швидкість заряду, год	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3	2-3
Саморозряд на місяць, %	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2

Акумулятор літій-полімерний 10000 mAh, 3.7v, 1260110[26]



Рис 2.2.17. li-ion 10 Ah, 3.7v, 1260110

- Країна виробник: Китай
- Тип акумулятора: Li-Pol
- Напруга акумулятору; 3.7 V
- Ємність: 10000 mA/год
- Довжина: 110 мм

- Ширина: 60 мм
- Товщина 12 мм

Висновок

Проаналізувавши відомі властивості Li-ion елементів очевидним є вибір літій-полімерного (Li-Pol) акумулятору. Це перевірене, надійне та доступне живлення для переносних пристрій, котре має такі важливі характеристики як: висока ємність і, відповідно, продуктивність; малі габаритні розміри і плоска тонка форма виготовлення; мала вага; низький рівень саморозряду і слабкий ефект пам'яті; висока безпека та екологічність; доступність.

Згідно до вимог живлення розробленого мною пристрій, найоптимальнішим вибором буде акумулятор Li-Pol типу 10000 mAh, 3.7v у кількості 6 штук, з'єднаних паралельно і послідовно відповідно до визначеного принциповою схемою способу експлуатації (зарядки та розрядки). (Див. Додаток Рис 6.6 USB)

Даний акумулятор доступний, що дасть змогу при необхідності його швидко замінити. І на відміну від інших типів акумуляторів: LiCo, LiMn, LiFePO4, LTO, Li-NMC від різних фірм та форм виготовлення, він відносно дешевий, має тонку плоску форму виконання та вбудовану плату керування зарядом/розрядом. Що робить його найкращим варіантом для живлення моого пристрію. І тому гарантує стабільну роботу та простоту виконання загальної конструкції.

3.2.8 Материнська плата

1. Compute Module 4 IO Board

CM4 IO Board[27] це основна плата для підключення Raspberry Pi Compute Module 4 до різних периферійних пристройів. Вона надає різноманітні порти та можливості підключення: HDMI, USB, Ethernet, слот для microSD, PCIe слот для розширення і підтримку камер через MIPI CSI-2.



Рис 2.2.18. Compute Module 4 IO Board

Переваги:

- Розширення можливостей: надає доступ до всіх основних інтерфейсів для підключення периферії.
- Інтерфейси для дисплеїв і камер: підтримує MIPI DSI для дисплеїв та MIPI CSI-2 для камер, що дозволяє створювати мультимедійні системи.
- Підтримка PoE: можливість живлення через Ethernet (PoE) спрощує монтаж і зменшує потребу в додаткових живильних кабелях.

Недоліки:

- Потрібен додатковий обв'язок: вимагає підключення Compute Module 4, що збільшує складність розробки та інтеграції.

- Обмеження по кількості портів: деякі інтерфейси, такі як USB, обмежені в портах.

2. Waveshare CM4 IO Base Board B

Ця плата розроблена компанією Waveshare[28] спеціально для Raspberry Pi Compute Module 4. Вона має компактний форм-фактор, зручний для вбудованих рішень, а також надає доступ до основних портів: HDMI, USB, Ethernet, камери та дисплеїв через MIPI.



Рис 2.2.19. Waveshare CM4 IO Base Board B

Переваги:

- Компактний розмір: зручно вбудовується у портативні пристрої, включаючи планшети.
- Повна підтримка CM4: має слот для eMMC-версій, слот microSD для Lite-версій.
- Виводи для GPIO: можна підключати сенсори, кнопки, інші периферійні пристрої.

Недоліки:

- Обмежені можливості розширення: відсутній PCIe слот.
 - Відсутність PoE: не підтримується живлення через Ethernet.
3. Seeed Studio reComputer CM4 IO Board

Розроблена компанією Seeed Studio[29] для використання з CM4, плата reComputer IO Board орієнтована на промислові рішення та мультимедійні пристрої. Має повноцінний набір інтерфейсів, включаючи HDMI, USB 3.0, GbE Ethernet, слот PCIe, RTC, і підтримує до 2 камер.

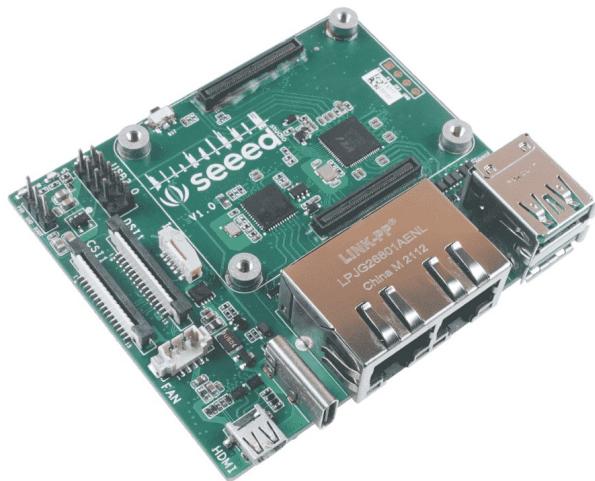


Рис 2.2.20. Seeed Studio reComputer CM4 IO Board

Переваги:

- Підтримка PCIe: дозволяє розширити функціональність через NVMe диски або інші модулі.
- Підтримка RTC: можливість точного відстеження часу без зовнішнього джерела.
- Гарна якість збірки та розведення.

Недоліки:

- Трохи більші габарити — не ідеально для тонких планшетів.
- Вища ціна у порівнянні з базовими платами.

Висновок

Compute Module 4 IO Board — це еталонна плата від Raspberry Pi Foundation, яка надає найбільшу гнучкість для розробників. Вона підтримує всі ключові інтерфейси, включно з PCIe, двома камерами, двома дисплеями, PoE та великим числом GPIO. Завдяки офіційній підтримці, надійності та великій кількості доступної документації, ця плата є найкращою базою для побудови прототипів і повноцінних DIY-пристроїв.

Однак для досягнення оптимального результату у фінальному пристрой доцільно розробити власну материнську плату, яка буде враховувати специфічні вимоги проекту: компактність, розташування роз'ємів, мінімізацію зайвих компонентів та оптимізацію енергоспоживання. Власна плата дозволить інтегрувати лише необхідні інтерфейси, зменшити габарити та вагу пристроя, а також підвищити надійність і зручність експлуатації у польових умовах.

Висновок по розділу 2.2

У цьому розділі було розглянуто основні компоненти, які можуть бути використані для побудови проекту. Raspberry Pi Compute Module 5 забезпечує високу продуктивність і гнучкість, а Compute Module 5 IO Board розширює можливості підключення периферійних пристройів. Сенсорний дисплей IBM Lenovo Wacom дозволяє створювати інтерактивні інтерфейси, а HackRF-One відкриває можливості для роботи з радіочастотними сигналами. USB карта

відеозахоплення LUX EasyCap є бюджетним рішенням для захоплення відео, а SSD диск Transcend MTS420S забезпечує швидке та надійне зберігання даних. Кожен із цих компонентів має свої переваги та недоліки, що слід враховувати при виборі елементної бази для конкретного застосування.

3.3 Розробка принципової електричної схеми

В основі розробленої системи лежить процесорний модуль Raspberry Pi Compute Module 5. Цей модуль є центральним елементом, що забезпечує обробку даних та керування всіма функціями пристрою.

3.3.1 Процесорний модуль та його інтерфейси:

На Рисунку 2.3.1 представлені деталі розводки ніжок (пінів) процесорного модуля. Це зображення є критично важливим для розуміння того, як модуль взаємодіє з іншими компонентами системи. Воно демонструє розташування та призначення всіх ключових виводів модуля, розділених на логічні групи для зручності проектування.

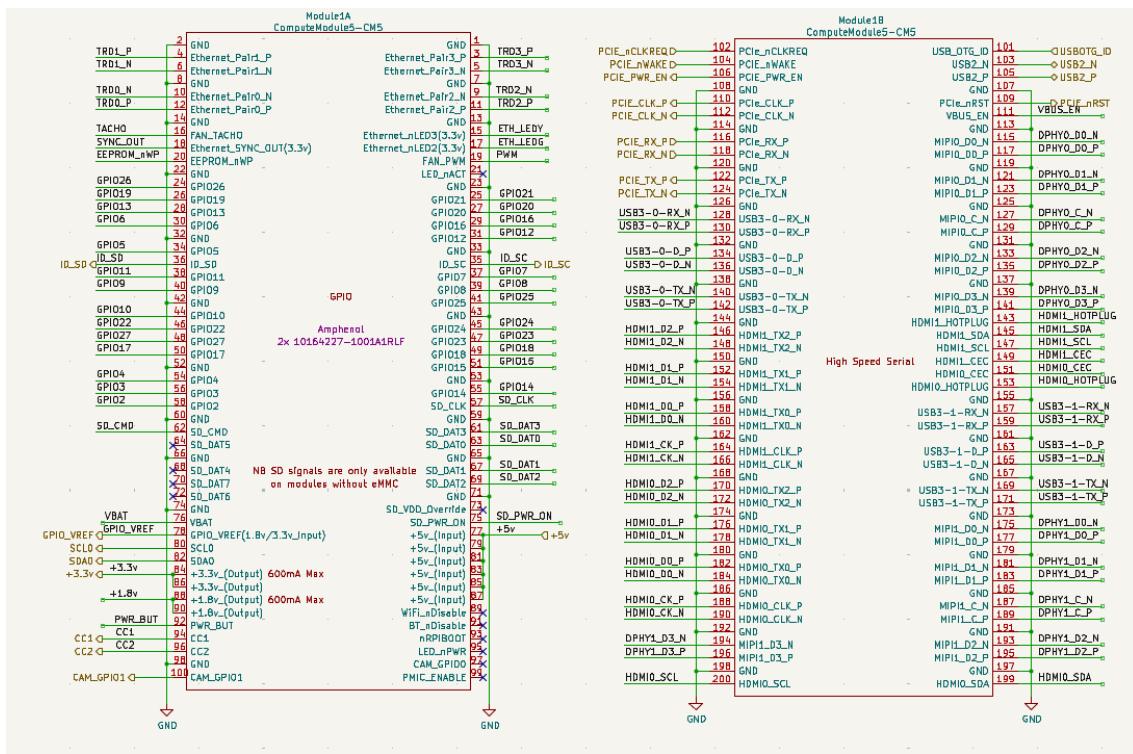


Рис 2.3.1. Ніжки процесорного модуля RPi Computer Module

Опис груп виводів, представлених на схемі:

Ліва сторона (Module1A):

- **TRDI, TRD0, TRD1, TRD2_N/P:** Ці лінії є частиною інтерфейсу Ethernet. Вони забезпечують диференціальну передачу даних для мережевого підключення.
 - **Ethernet_Pair_N/P:** Також відносяться до інтерфейсу Ethernet, формуючи чотири диференціальні пари, необхідні для реалізації 10/100/1000BASE-T зв'язку.
 - **TACH0, SYNCOUT, EEPROM_WPNP:** Ці виводи можуть бути пов'язані з керуванням синхронізацією або використанням спеціальних

периферійних пристройв. EEPROM_WPNP пов'язаний із захистом пам'яті.

- **GPIOx:** Велика кількість ніжок загального призначення (General Purpose Input/Output), які є універсальними для підключення широкого спектру периферійних пристройв, таких як датчики, кнопки, світлодіоди, реле. Вони дозволяють конфігурувати лінії як вхідні або вихідні для керування зовнішніми пристроями або зчитування їх стану.
- **SD_CMD, SD_DATx:** Виводи для інтерфейсу SD-карти, що використовується для завантаження операційної системи та зберігання даних.
- **VBAT, GPIO_VREF, SCL0, SDA0:** VBAT - вхід для батареї або резервного живлення. SCL0 та SDA0 - лінії інтерфейсу I²C, що використовується для зв'язку з багатьма периферійними пристроями (датчики, EEPROM).
- **Позитивне живлення (+3.3V, +1.8V):** Вихідні або вхідні лінії живлення різних напруг, необхідні для роботи модуля та деяких зовнішніх компонентів.
- **PWR_BUT:** Лінія, яка може використовуватися для програмного вмикання/вимикання або перезавантаження модуля.
- **CCx_C/CAM_GPI01:** Лінії пов'язані з інтерфейсами камери (Camera Serial Interface - CSI), що дозволяє підключати цифрові камери.

Права сторона (Module1B):

- **USB_OTG_ID, USBx_N/P:** Ці виводи формують інтерфейс USB. USB_OTG_ID може використовуватися для визначення режиму роботи

(Host/Device), а **USBx_N/P** - це диференціальні пари для передачі даних по USB.

- **VBUS_EN:** Лінія керування живленням для USB-пристроїв.
- **DPHY0_D/C_N/P, DPHY1_D/C_N/P, DPHY2_D/C_N/P, DPHY3_D/C_N/P:** Ці групи виводів відносяться до інтерфейсу MIPI D-PHY (Mobile Industry Processor Interface Physical Layer). Вони використовуються для високошвидкісної передачі даних до або від дисплеїв (DSI) та камер (CSI). Кожна група включає диференціальні лінії даних (D) та тактування (C).
- **HDMI_HOTPLUG, HDMI_HPD, HDMI_SCL, HDMI_CEC:** Виводи для інтерфейсу HDMI, що забезпечує виведення відеосигналу. HDMI_HOTPLUG та HDMI_HPD використовуються для визначення підключення дисплея. HDMI_SCL/SDA - лінії I²C для зв'язку з EDID-пам'яттю дисплея. HDMI_CEC - для керування зовнішніми пристроями через HDMI (Consumer Electronics Control).
- **USB3-X_RX/TX_P/N:** Ці лінії вказують на підтримку високошвидкісного інтерфейсу USB 3.0 (SuperSpeed USB), з окремими диференціальними парами для прийому (RX) та передачі (TX) даних.
- **HDMI0/1_D_N/P, HDMI0/1_CLK_N/P:** Основні диференціальні лінії даних та тактування для інтерфейсів HDMI.
- **HDMIO_SCL/SDA:** Додаткові лінії I²C для HDMI.

Використання цих виводів у принциповій електричній схемі буде детально описано у наступних підрозділах, де буде обґрунтовано вибір конкретних GPIO для керування периферичними пристроями, а також

підключення високошвидкісних інтерфейсів до відповідних роз'ємів та компонентів.

3.3.2 Організація кола живлення

Надійна система живлення є критично важливою для стабільної роботи будь-якого електронного пристрою. Представлена схема (Рисунок 2.3.2) демонструє архітектуру живлення, що забезпечує необхідні рівні напруги для всіх компонентів системи, включаючи процесорний модуль та периферійні пристрой. Система живлення розроблена для роботи від зовнішнього джерела постійного струму та включає кілька етапів перетворення та стабілізації напруги.

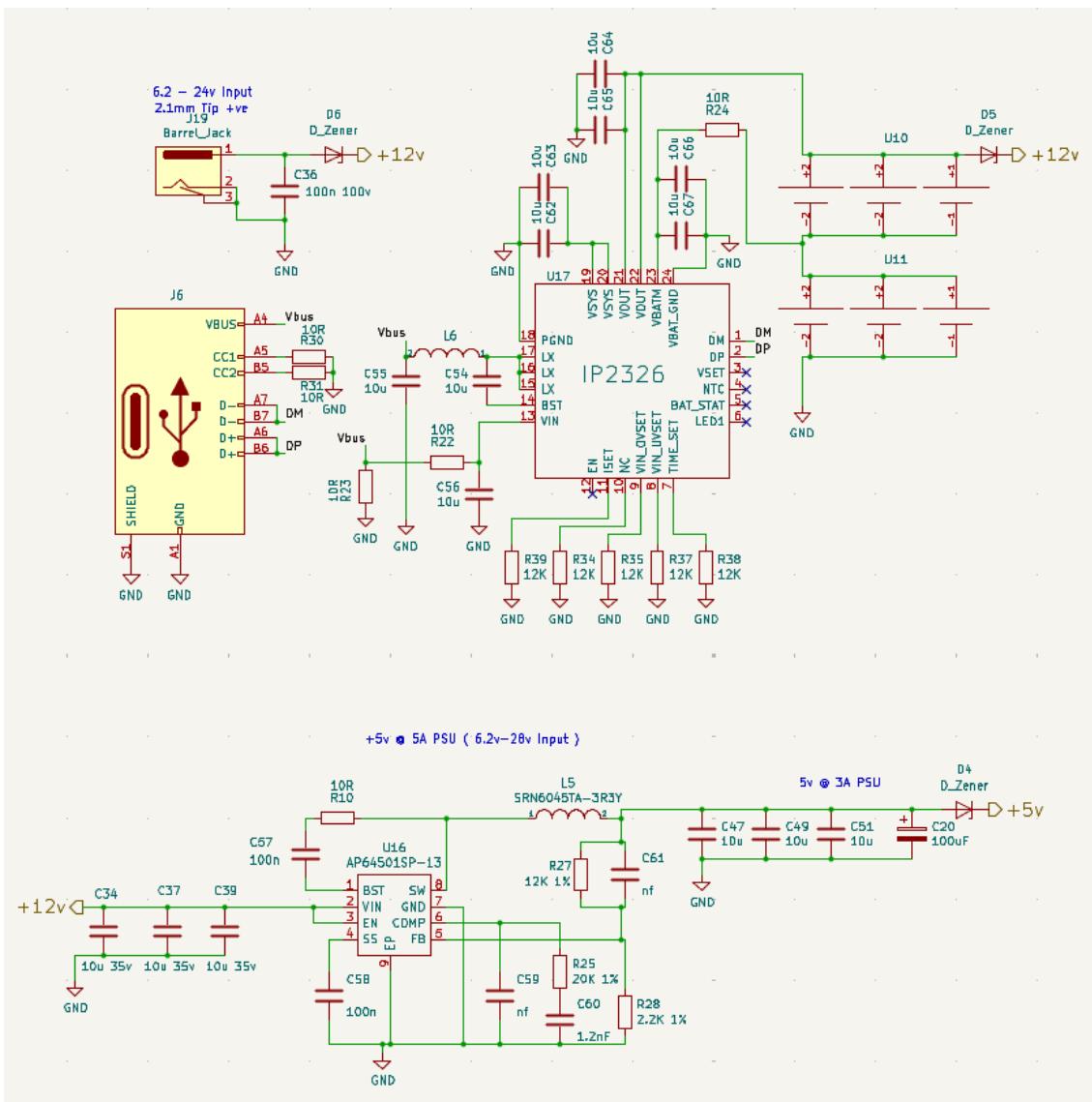


Рис 2.3.2. Кола живлення

Вхідний каскад живлення та захист:

Живлення пристрою здійснюється через роз'єм **J10 (Barrel Jack)**, призначений для підключення зовнішнього джерела постійного струму в діапазоні **6.2 В - 24 В**. Конденсатор **C36 (100n 100V)**: Служить для фільтрації

високочастотних шумів на вхідній лінії живлення, забезпечуючи більш чисту напругу для наступних перетворювачів.

Мікросхема IP2326 (USB Type-C Power Delivery Controller/Converter):

Мікросхема **IP2326 (U17)** [31] є ключовим елементом для живлення через інтерфейс USB Type-C, зокрема для реалізації функцій Power Delivery (PD). Це дозволяє не тільки живити пристрій від USB Type-C джерела, але й керувати режимами зарядки або живлення для інших пристройів, підключених до USB. **J6 (USB Type-C):** Це роз'єм USB Type-C, який підключається до IP2326.

VBUS, CC1, CC2, D+, D-, SHIELD, GND: Стандартні виводи роз'єму USB Type-C, які дозволяють передавати живлення (VBUS), дані (D+, D-) та керуючі сигнали (CC1, CC2), необхідні для ініціалізації Power Delivery.

Обв'язка IP2326:

- **PGND, LX, SW, VIN:** Вхідні та вихідні лінії для внутрішнього імпульсного перетворювача, який формує VBUS для USB.
- **VSYS_OUT, VSYS_IN, VBMON, VBAT_OUT, VBAT_IN, VBAT_GND:** Лінії, що стосуються системного живлення та моніторингу батареї. Це вказує на можливість керування зарядкою або живленням від акумулятора.
- **NTC, BAT_STAT, LED1:** Виводи для підключення термістора (NTC) для моніторингу температури батареї, індикації статусу зарядки (BAT_STAT) та світлодіода (LED1).

- **VSET, ISET, TIME_SET, EN, AC:** Керуючі виводи для налаштування вихідної напруги (VSET), струму (ISET), часу (TIME_SET), активації (EN) та індикації живлення від АС (AC).
- **R39, R34, R35, R37, R38:** Набір резисторів, які, використовуються для налаштування параметрів IP2326, таких як вихідна напруга, струм зарядки/живлення, або для визначення режимів PD.
- **L6, C54, C55, C56:** Індуктор та конденсатори, які є невід'ємною частиною імпульсного перетворювача для стабілізації та фільтрації напруги.

Формування напруги +5В @ 5А (PSU):

Цей блок відповідає за формування стабілізованої напруги **+5В** з високим струмом до **5А**, що є критично важливим для живлення процесорного модуля та інших високопотужних компонентів. Вхідна напруга для цього блоку становить **+6.2-24В. U16 (AP64501SP-13):** Це імпульсний понижуючий перетворювач (Buck Converter) від Analog Power [32]. Його використання дозволяє ефективно перетворювати вхідну напругу (+12В) на потрібні +5В з мінімальними втратами на тепло.

- **VIN:** Вхід живлення від +12В. Фільтруючі конденсатори C34, C37, C38 (10u 35V) на вході забезпечують стабільність вхідної напруги та фільтрацію шумів.
- **BST, SW, PGND, GND, EN, FB:** Стандартні виводи імпульсного перетворювача: BST (bootstrap), SW (switching node), PGND (power ground), GND (signal ground), EN (enable), FB (feedback).

- **FB (Feedback):** Цей вивід підключається до резистивного дільника (R27, R28), який встановлює вихідну напругу +5В.
- **L5 (SRN6045TA-3R3Y):** Індуктор, який є ключовим компонентом імпульсного перетворювача. Його номінал (3.3 мГн, судячи з маркування 3R3) важливий для стабільності та ефективності перетворення.
- **Конденсатори C47, C49, C50, C20:** Вихідні конденсатори (10u, 100u) для фільтрації та стабілізації вихідної напруги +5В, згладжуючи пульсації, характерні для імпульсних перетворювачів.
- **C58 (100n):** Додатковий фільтруючий конденсатор.
- **C59 (1.2nF), C60:** Ці компоненти є частиною компенсаційної мережі для стабільності зворотного зв'язку імпульсного перетворювача.
- **R25 (20K 1%), R27 (12K 1%), R28 (2.2K 1%):** Резистори зворотного зв'язку, що визначають точність вихідної напруги +5В. Їхня точність (1%) важлива для стабільності вихідної напруги.
- **D_Zener (D4):** Додатковий діод Зенера на виході +5В, що забезпечує захист від перенапруги для шини +5В.

Кола фільтрації та розв'язки:

По всій схемі розкидані конденсатори малої ємності (наприклад, 10n, 100n, 10u), які служать для блокування високочастотних шумів (decoupling capacitors) та згладжування пульсацій на лініях живлення поблизу мікросхем (C64, C65, C67, C68 поблизу U17). Це допомагає забезпечити стабільне та чисте живлення для чутливих цифрових та аналогових схем.

Висновки щодо організації живлення:

Представлена схема живлення є комплексною та добре продуманою, забезпечуючи:

1. **Широкий діапазон вхідної напруги:** Можливість роботи від джерела 6.2В до 24В.
2. **Гнучкість живлення:** Підтримка живлення через традиційний barrel jack та сучасний USB Type-C з Power Delivery.
3. **Ефективність:** Використання імпульсних перетворювачів (AP64501SP-13) для формування +5В, що мінімізує втрати енергії та тепловиділення, особливо при великих струмах.
4. **Стабілізація:** Забезпечення стабільних вихідних напруг (+5В, +12В) для всіх компонентів.
5. **Захист:** Наявність діодів Зенера на вхідних та вихідних лініях живлення для захисту від перенапруги.
6. **Фільтрація:** Широке використання фільтруючих та блокуючих конденсаторів для забезпечення чистого живлення.

Ця архітектура живлення забезпечує надійну та стабільну роботу всього електронного пристрою.

3.3.3 Реалізація інтерфейсів та роз'ємів

Цей підрозділ детально описує ключові інтерфейси та роз'єми, які забезпечують взаємодію розробленого пристрою із зовнішнім світом, мережею та периферійними пристроями. Вибір та реалізація цих інтерфейсів є критично важливими для функціональності та гнучкості системи.

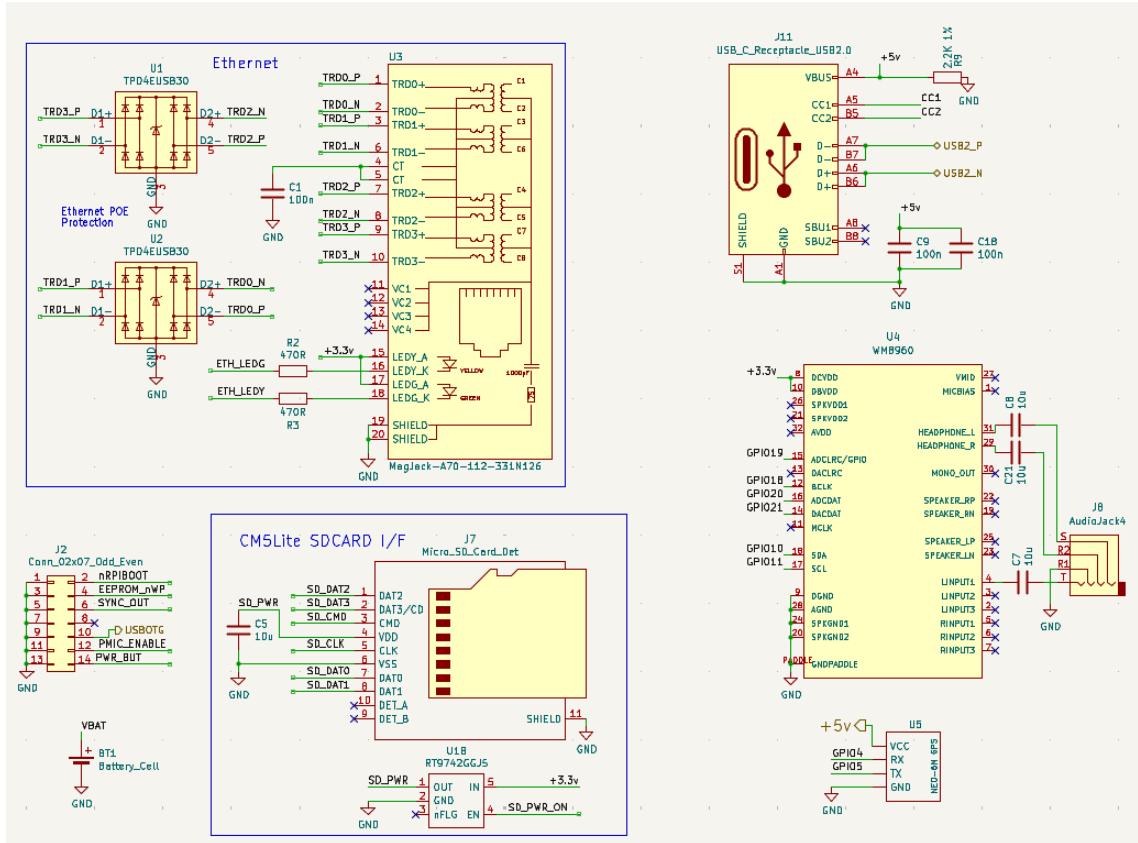


Рис 2.3.3. Роз'єми Type C, Ethernet, MicroSD Audio, GPS

Інтерфейс Ethernet:

Блок Ethernet (верхня ліва частина схеми) забезпечує дротове мережеве підключення, що є важливим для стабільної та високошвидкісної передачі даних.

U1 та U2 (TPD4E05B30): Це мікросхеми захисту від електростатичного розряду (ESD) та перенапруги для ліній Ethernet [33]. Вони захищають диференціальні пари TRD0_N/P, TRD1_N/P, TRD2_N/P, TRD3_N/P, які несуть високошвидкісні сигнали даних, від пошкодження, що є критичним для надійної роботи мережевого інтерфейсу.

- **J3 (Magjack – A70-112-331N26):** Це інтегрований роз'єм Ethernet (RJ45) з вбудованим трансформатором та світлодіодними індикаторами стану (LED_A, LED_G).
- **Вбудований трансформатор:** Необхідний для гальванічної розв'язки між мережевим контролером та Ethernet-кабелем, захищаючи обладнання від перешкод та різних потенціалів землі.
- **LED_A (Activity/Link) та LED_G (Link/Activity):** Світлодіоди, підключені через резистори R2 (470R) та R3 (470R) до лінії +3.3V, індикують активність мережі та наявність з'єднання.
- **TRD_N/P (TDx+, TDx-):** Це виводи диференціальних пар для передачі/прийому даних Ethernet. Вони підключаються безпосередньо до процесорного модуля або до зовнішнього контролера Ethernet, якщо такий є. Конденсатори (C1, C2, C3, C4) на цих лініях служать для АС-зв'язку (фільтрації постійної складової) та узгодження імпедансу.

Інтерфейс USB Type-C (J11):

Роз'єм **J11 (USB_C_Receptacle_USB2.0)** забезпечує можливість живлення пристрою та обміну даними через стандартний інтерфейс USB Type-C.

- **VBUS:** Лінія живлення (+5V).
- **CC1, CC2:** Конфігураційні канали, які використовуються для визначення орієнтації кабелю, ролі пристрою (хост/пристрій) та узгодження режиму живлення (наприклад, USB Power Delivery, хоча цей роз'єм позначений як USB2.0). Резистори R4 та R5 (2.2K) на цих лініях використовуються для визначення ролі пристрою (наприклад, DFP/UFP).

- **D+, D-:** Диференціальні лінії даних USB 2.0. Конденсатори C18 та C19 (100n) служать для фільтрації високочастотних шумів на цих лініях.
- **SBU1, SBU2:** Додаткові лінії, які можуть використовуватися для альтернативних режимів роботи USB Type-C (наприклад, для передачі відео).
- **SHIELD, GND:** Заземлення та екран для захисту від перешкод.

Інтерфейс CM5Lite SDCARD I/F (J7):

Цей блок відповідає за підключення карти пам'яті формату MicroSD, яка, як правило, використовується для зберігання операційної системи, програмного забезпечення та даних.

- **J7 (Micro_SD_Card_Det):** Роз'єм для MicroSD-карти з детектором присутності карти.
- **SD_DAT0, SD_DAT1, SD_DAT2, SD_DAT3, SD_CMD, SD_CLK:** Стандартні виводи для інтерфейсу SD-карти (data, command, clock).
- **U1B (RTS7420GJS):** Це мікросхема що забезпечує перетворення рівня напруги (level shifter) або керування живленням для SD-карти.
- **SD_PWR:** Лінія керування живленням SD-карти.
- **IN, OUT, INFO, EN:** Вхідні та вихідні лінії для керування живленням, інформації про стан та активації. Конденсатор C51 (4.7u) на виході PWR_ON є фільтруючим.

Аудіоінтерфейс (U4 та J8):

Блок аудіо забезпечує відтворення та запис звуку.

- **U4 (WM8960):** Це аудіокодек, який інтегрує аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі (АЦП/ЦАП), а також підсилювачі для навушників/динаміків та мікрофонні входи [34].
- **DCVDD, DBVDD, AVDD, SPKVDD2:** Лінії живлення для різних секцій кодека (цифрова, аналогова, живлення динаміка). Фільтруючі конденсатори C3, C11, C12, C13, C14, C21 забезпечують стабільне живлення.
- **MCLK, BCLK, DACLRC, ADCLRC, DACDAT, ADCDAT:** Лінії для обміну даними та тактовими сигналами з процесорним модулем (Master Clock, Bit Clock, Left/Right Clock, Data In/Out).
- **HEADPHONE_L/R, SPEAKER_L/R, SPEAKER_EN:** Виходи для навушників та динаміків, а також лінія керування вмиканням/вимиканням динаміків.
- **MONO_OUT:** Монофонічний аудіовихід.
- **LINPUTx, RINPUTx:** Вхідні лінії для підключення мікрофонів або інших аудіоджерел (наприклад, LINPUT1-3, RINPUT1-3).
- **GPIOx:** Додаткові виводи загального призначення, які можуть використовуватися для керування або індикації.
- **AGND, DGND:** Аналогове та цифрове заземлення.
- **J8 (Audiojack4):** Роз'єм для підключення аудіопристроїв, таких як навушники або зовнішні динаміки.

Додаткові інтерфейси та керування живленням (J2):

Цей блок, позначений як **Conn 02/07 Odd Even**, містить різні керуючі та інтерфейсні лінії, що підключаються до процесорного модуля.

- **NRPBOOT, EEPROM_WPNP:** Лінії, пов'язані з режимом завантаження (NRPBOOT) та захистом пам'яті EEPROM (EEPROM_WPNP).
- **SYNC_DTG:** Лінія синхронізації.
- **USBDT_G:** Пов'язана з USB (USB debug).
- **PMIC_ENABLE, PWR_BUT:** Лінії керування живленням, які дозволяють вмикати/вимикати або перезавантажувати систему.
- **VBAT:** Лінія для підключення зовнішнього джерела живлення батареї, або для моніторингу системної напруги.

Інтерфейс GPS (U5): У нижній правій частині схеми представлений блок для інтеграції GPS-модуля. **GPIO4, GPIO5:** Це лінії GPIO, які використовуються для обміну даними (RX, TX) з GPS-модулем через інтерфейс UART, що є стандартним для багатьох GPS-приймачів.

Висновки щодо реалізації інтерфейсів:

Надана схема демонструє комплексну реалізацію різноманітних інтерфейсів, які є фундаментальними для функціональності пристрою. Це включає:

- **Надійне мережеве підключення** через Ethernet з вбудованим захистом та трансформатором.
- **Гнучке живлення та передачу даних** через USB Type-C.
- **Можливість розширення пам'яті** за допомогою MicroSD-карти.
- **Повноцінний аудіоінтерфейс** з кодеком для відтворення та запису звуку.
- **Інтеграція GPS-модуля** для визначення місцезнаходження.

- **Керування живленням** та іншими системними функціями через спеціалізовані виводи.

Кожен з цих інтерфейсів ретельно розроблений з урахуванням необхідних захисних елементів та фільтрації для забезпечення стабільної та надійної роботи.

3.3.4 Реалізація високошвидкісних інтерфейсів та роз'ємів

У цьому підрозділі продовжено опис ключових інтерфейсів, зосереджуючись на високошвидкісних лініях передачі даних, які є критично важливими для мультимедійних та периферійних функцій пристрою.

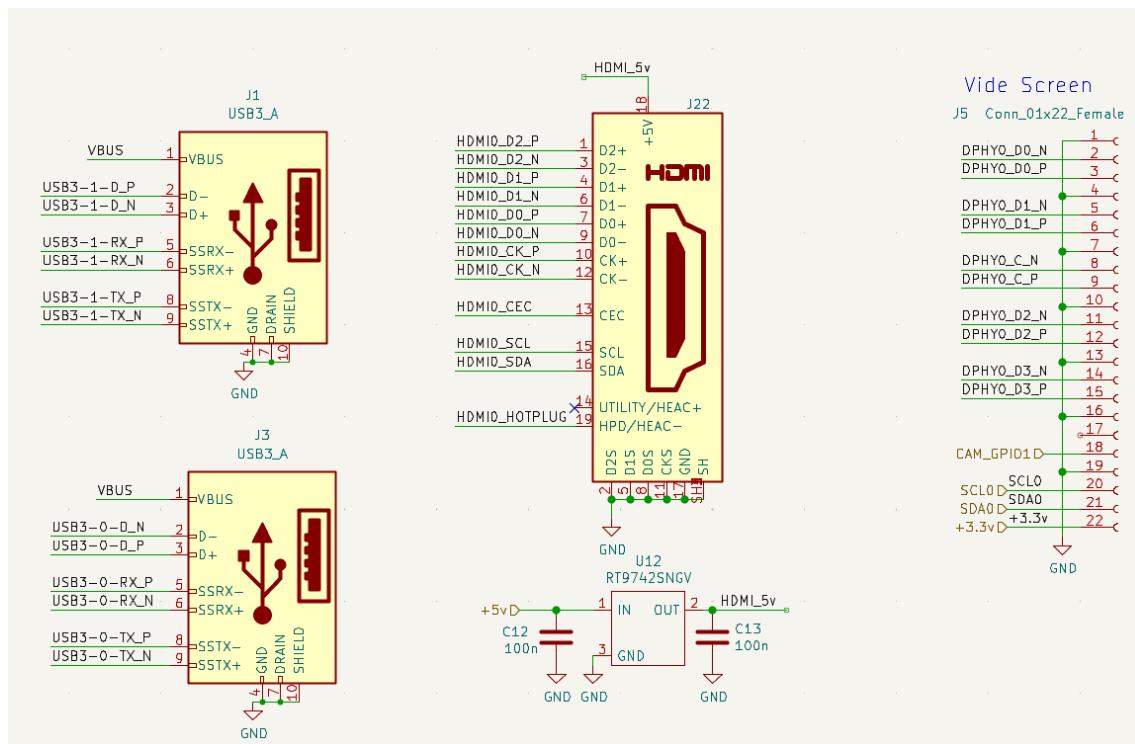


Рис 2.3.4. Роз'єми USB3, HDMI та екран

Інтерфейси USB 3.0:

На схемі представлені два роз'єми **USB3_A (J1 та J3)**, що вказує на наявність як мінімум двох портів USB 3.0. Це забезпечує високу швидкість передачі даних для підключення сучасних периферійних пристрій, таких як зовнішні накопичувачі, вебкамери високої роздільної здатності тощо.

- **VBUS:** Лінія живлення (+5В) для підключених USB-пристроїв.
- **D+, D-:** Стандартні диференціальні пари даних для USB 2.0 (High-Speed). Вони сумісні з USB 3.0 та дозволяють працювати з пристроями USB 2.0.
- **SSRX+, SSRX-:** Диференціальні пари для прийому даних (SuperSpeed Receive) USB 3.0. Забезпечують швидкість до 5 Гбіт/с.
- **SSTX+, SSTX-:** Диференціальні пари для передачі даних (SuperSpeed Transmit) USB 3.0. Також забезпечують швидкість до 5 Гбіт/с.
- **GND, SHIELD:** Заземлення та екран роз'єму для захисту від електромагнітних перешкод.

Наявність двох окремих роз'ємів USB 3.0 означає, що система підтримує кілька одночасних високошвидкісних підключень, що підвищує її функціональність. Ці лінії USB3-x-y-D_N/P та USB3-x-y-RX/TX_N/P підключаються безпосередньо до відповідних виводів процесорного модуля, як це було показано на Рисунку 2.3.1 (Модуль Module1B).

Інтерфейс HDMI:

Роз'єм **HDMI (J22)** є ключовим для виведення високоякісного відео та аудіосигналу на зовнішні дисплеї (монітори, телевізори).

- **HDMI0_D0_P/N, HDMI0_D1_P/N, HDMI0_D2_P/N:** Це три диференціальні пари даних (TMDS data channels), які передають власне відеодані.
- **HDMI0_CLK_P/N:** Диференціальна пара тактування (TMDS clock), яка синхронізує передачу даних.
- **HDMI0_CEC (Consumer Electronics Control):** Лінія, що дозволяє керувати іншими HDMI-сумісними пристроями (наприклад, вмикати телевізор, перемикати вхід).
- **HDMI0_SCL, HDMI0_SDA:** Лінії інтерфейсу I²C, які використовуються для обміну даними EDID (Extended Display Identification Data) з підключеним дисплеєм. Це дозволяє пристрою дізнатися про підтримувані роздільні здатності та формати дисплея.
- **HDMI0_HOTPLUG (HPD/HEAC):** Лінія Hot Plug Detect, яка інформує пристрій про підключення або відключення HDMI-кабелю. Також може використовуватися для функцій HDMI Ethernet Channel (HEAC).
- **+5V_D:** Лінія живлення +5В для живлення EDID EEPROM у кабелі HDMI та для керування деякими функціями.
- **U12 (RT9742SNGV):** Це мікросхема керування живленням або захисний елемент для лінії +5V_D, що забезпечує стабільне живлення та/або захист від перевантажень/коротких замикань на HDMI-роз'ємі. Конденсатори C12 та C13 (100n) служать для фільтрації шуму на лінії живлення.

Лінії HDMI (HDMI0_D_N/P, HDMI0_CLK_N/P, HDMI0_CEC, HDMI0_SCL/SDA, HDMI0_HOTPLUG) безпосередньо підключаються до відповідних виводів процесорного модуля, які позначені на Рисунку 2.3.1 (Модуль Module1B) в секції “High Speed Serial”.

Інтерфейс для екрану (MIPI D-PHY / Video Screen - J5):

Роз'єм **J5 (Conn_01x1x22_Female)** призначений для підключення зовнішнього дисплея з використанням інтерфейсу MIPI D-PHY (Mobile Industry Processor Interface Physical Layer). Це високошвидкісний інтерфейс, який зазвичай використовується для підключення дисплеїв (DSI - Display Serial Interface) та камер (CSI - Camera Serial Interface) у мобільних та вбудованих системах.

- **DPHYO_D0_N/P, DPHYO_D1_N/P, DPHYO_D2_N/P, DPHYO_D3_N/P:** Це чотири диференціальні пари даних MIPI D-PHY. Кожна пара передає дані послідовно.
- **DPHYO_C_N/P:** Диференціальна пара тактування MIPI D-PHY, що синхронізує передачу даних по всіх парах даних.
- **CAM_GPIO1D1:** Цей вивід є лінією GPIO, пов'язаною з функціями камери або дисплея, яка може використовуватися для керування (наприклад, скидання дисплея, вмикання підсвічування) або індикації стану.
- **SCL0, SDA0:** Лінії інтерфейсу I²C, що використовуються для зв'язку з дисплеєм (наприклад, для керування підсвічуванням, отримання інформації про дисплей). Ці ж лінії I²C можуть бути мультиплексовані з іншими інтерфейсами (наприклад, HDMI I²C, як показано на Рисунку 2.3.1).
- **+3.3V, GND:** Лінії живлення (+3.3V) та заземлення для живлення дисплея.

Використання MIPI D-PHY для підключення екрану підкреслює орієнтацію проекту на компактні рішення та високу якість зображення, характерну для мобільних пристройів. Лінії DPHYO_D_N/P та DPHYO_C_N/P безпосередньо підключаються до відповідних виводів процесорного модуля, як це було показано на Рисунку 2.3.1 (Модуль Module1B) у секції “High Speed Serial”.

Висновки щодо реалізації високошвидкісних інтерфейсів:

Наданий фрагмент схеми демонструє високий рівень функціональності пристрою в частині мультимедіа та підключення периферії. Наявність двох портів USB 3.0 забезпечує швидкий обмін даними, тоді як HDMI та MIPI D-PHY дозволяють підключати різноманітні дисплеї, від зовнішніх моніторів до вбудованих екранів, забезпечуючи високоякісний відеовихід. Усі ці інтерфейси спроектовані з урахуванням вимог до цілісності сигналу та захисту, що є критичним для їхньої стабільної та надійної роботи.

3.3.5 Реалізація інтерфейсу M2

У цьому підрозділі розглянуто реалізацію інтерфейсу M.2, який забезпечує гнучкість у підключення додаткових модулів, таких як NVMe SSD, Wi-Fi/Bluetooth модулі, або 4G/5G модеми, а також пов’язані з ним компоненти живлення та тактування.

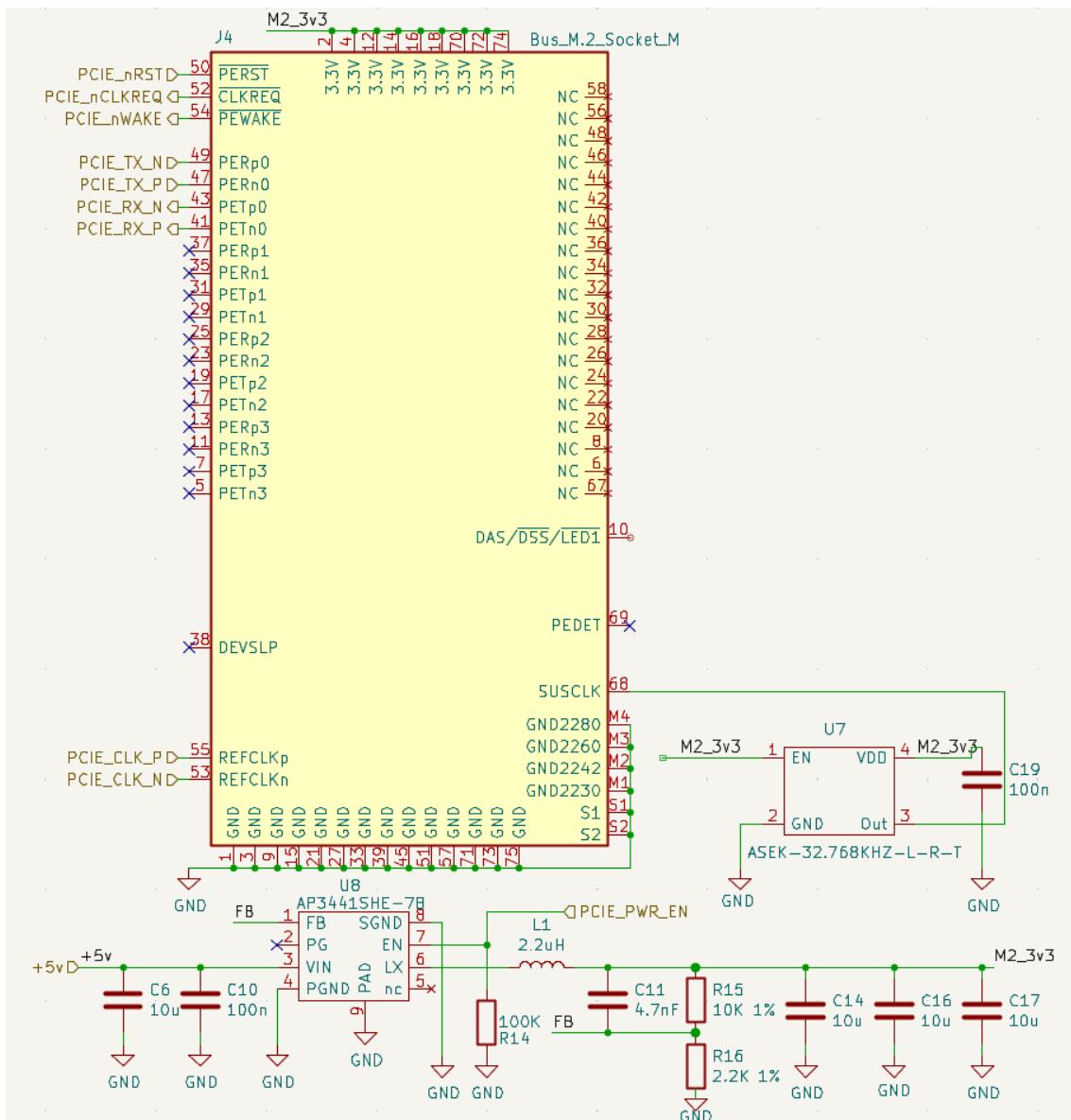


Рис 2.3.5. M2 SSD

Інтерфейс M.2 (Bus_M.2_Socket_M):

Роз'єм J4 (Bus_M.2_Socket_M) є основним інтерфейсом для підключення M.2 модуля. Він забезпечує високошвидкісний зв'язок через шину PCIe, а також інші необхідні сигнали.

- **PCIe_TX_N/P, PCIe_RX_N/P (PERPx, PERPx_N/P):** Ці диференціальні пари представляють лінії передачі (TX) та прийому (RX) для інтерфейсу PCI Express (PCIe). На схемі показано чотири канали PCIe (PERP0, PERP1, PERP2, PERP3), що вказує на підтримку PCIe x4. Це дозволяє підключати високопродуктивні NVMe SSD, які потребують високої пропускної здатності.
- **PCIe_NRSTD, PCIe_NCLKREQ, PCIE_NWAKE:** Це керуючі сигнали PCIe.
- **PCIe_NRSTD:** Скидання PCIe (Reset).
- **PCIe_NCLKREQ:** Запит тактування PCIe (Clock Request), використовується для керування режимами енергозбереження.
- **PCIE_NWAKE:** Сигнал пробудження PCIe (Wake-up).
- **NC (No Connect):** Багато виводів роз'єму позначені як NC, що означає “не підключено”. Це стандартно для універсальних роз'ємів M.2, де не всі піни використовуються у всіх конфігураціях.
- **3.3V:** Лінії живлення +3.3В для M.2 модуля.
- **PEDET (Pin Event Detect):** Цей вивід може використовуватися для виявлення присутності модуля або інших подій, пов'язаних з ним.
- **DAS/DSS/LED1:** Ці виводи можуть використовуватися для індикації активності даних (Data Activity Status), стану диска (Drive Status), або для керування світлодіодом (LED1) на M.2 модулі.

Лінії PCIe_TX_N/P, PCIe_RX_N/P, PCIe_NCLKREQ, PCIE_NWAKE та PCIe_NRSTD підключаються безпосередньо до відповідних виводів

процесорного модуля, як це було показано на Рисунку 2.3.1 (Module1B) у секції “PCIe”.

Живлення для M.2 модуля (+3.3В):

Для забезпечення стабільного живлення M.2 модуля використовується окремий імпульсний понижуючий перетворювач, що формує напругу +3.3В.

- **U8 (AP3441SHE-7B):** Це синхронний понижуючий DC/DC перетворювач. Він приймає вхідну напругу +5В та перетворює її на +3.3В, необхідні для живлення M.2 модуля [35].
- **VIN:** Вхід живлення від +5В. Конденсатори C6 (10u) та C10 (100n) забезпечують фільтрацію вхідної напруги.
- **FB (Feedback):** Вивід зворотного зв’язку, підключений до резистивного дільника (R14 - 100K), який визначає вихідну напругу +3.3В.
- **EN:** Вивід керування дозволом (Enable) для увімкнення/вимкнення перетворювача. Підключення до “PCIE_PWR_EN” вказує, що живлення для M.2 активується за певним керуючим сигналом.
- **LX, SW, PGND, GND, SGND:** Виводи для внутрішнього імпульсного перетворювача (комутаційний вузол, силові та сигнальні заземлення).
- **L1 (2.2uH):** Індуктор, який є ключовим компонентом імпульсного перетворювача, необхідний для накопичення енергії та формування стабілізованої вихідної напруги.
- **C11 (4.7nF):** Компенсаційний конденсатор.
- **R15 (10K 1%), R16 (2.2K 1%):** Резистори зворотного зв’язку, що разом з R14 формують дільник напруги для встановлення точної вихідної напруги +3.3В.

- **C14, C16, C17 (10u, 10u, 10u):** Вихідні конденсатори для фільтрації та стабілізації вихідної напруги +3.3В, згладжуючи пульсації.

Тактування PCIe (PCIe_CLK):

Для коректної роботи інтерфейсу PCIe необхідний стабільний тактовий сигнал.

- **U7 (ASEK-32.768KHZ-L-R-T):** Це генератор тактового сигналу (кварцовий генератор або осцилятор), який забезпечує тактування для PCIe. Хоча маркування 32.768KHz зазвичай вказує на годинниковий кварц, це може бути помилка або ж це базовий генератор, від якого походить основне тактування через PLL. Важливо, що він забезпечує референсний тактовий сигнал для PCIe.
- **EN:** Вхід дозволу для увімкнення генератора.
- **VDD:** Живлення (+3.3В).
- **Out:** Вихід тактового сигналу.
- **PCIe_CLK_N/P:** Ці виводи представляють диференціальну пару для тактового сигналу PCIe (PCIe Reference Clock), яка подається на M.2 роз'єм. Диференціальне тактування є критичним для високошвидкісних інтерфейсів, оскільки зменшує вплив шуму та забезпечує точну синхронізацію.

Висновки щодо реалізації інтерфейсу M.2:

Інтеграція інтерфейсу M.2 значно розширює функціональні можливості пристрою, дозволяючи підключати різноманітні високопродуктивні модулі. Розробка забезпечує:

- **Високошвидкісний зв'язок:** Підтримка PCIe x4 для максимальної пропускної здатності.
- **Стабільне живлення:** Окремий ефективний DC/DC перетворювач для +3.3В живлення M.2 модуля.
- **Надійне тактування:** Забезпечення стабільного диференціального тактового сигналу для PCIe.
- **Керування живленням та станом:** Наявність керуючих ліній для активації та моніторингу модуля.

Ця реалізація підкреслює модульність та розшируваність архітектури пристрою, дозволяючи адаптувати його під різні завдання за допомогою стандартних компонентів M.2.

3.3.6 Загальна компоновка та 3D вигляд друкованої плати

Після розробки принципової електричної схеми наступним етапом є компоновка компонентів на друкованій платі (PCB) та її фізичне проектування. Цей підрозділ надає 3D вигляд розробленої плати, демонструючи розташування ключових функціональних блоків та роз'ємів, що забезпечує інтуїтивне розуміння фізичної реалізації пристрою.

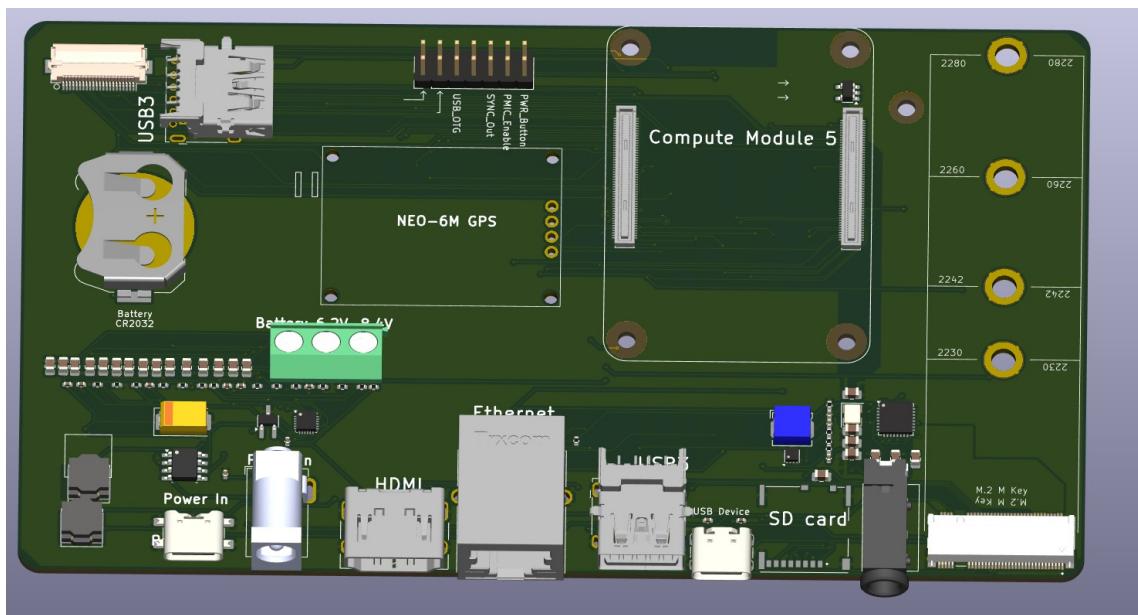


Рис 2.3.6. 3Д вигляд друкованої плати

На Рисунку 2.3.4 представлено 3D вигляд розробленої друкованої плати, що включає всі компоненти та інтерфейси, детально описані в попередніх підрозділах. Компоновка плати оптимізована для забезпечення ефективного розподілу живлення, мінімізації шумів, цілісності високошвидкісних сигналів та зручності монтажу.

Ключові елементи та їх розташування на платі:

- Процесорний модуль (Compute Module 5):** Розташований у верхній правій частині плати. Це центральний елемент, що підключається до системного роз'єму (SO-DIMM-подібний роз'єм). Його близьке розташування до високошвидкісних інтерфейсів (таких як HDMI, MIPI D-PHY, PCIe) мінімізує довжину доріжок, що критично для цілісності сигналу.

2. **Роз'єми USB 3.0 (USB3):** Два роз'єми USB 3.0 розташовані у верхній лівій частині плати. Це дозволяє зручно підключати зовнішні високошвидкісні периферійні пристрої, такі як накопичувачі або камери.
 3. **GPS-модуль (NEO-6M GPS):** Розташований у центральній лівій частині плати. Ймовірно, це модуль UBLOX NEO-6M, що забезпечує функціональність визначення місцезнаходження. Його розташування на краю плати або в зоні з мінімальними перешкодами допомагає покращити прийом супутникового сигналу. Поруч, імовірно, знаходиться роз'єм для зовнішньої GPS-антени (маленький золотий роз'єм).
4. **Кола живлення (Power In, Battery CR2032, Battery 6.2V-24V):**
- **“Power In” (Barrel Jack):** Розташований у нижній лівій частині плати. Це основний вхід для живлення пристрою від зовнішнього адаптера.
 - **“Battery CR2032”:** Тримач для батареї CR2032, ймовірно, для живлення годинника реального часу (RTC) процесорного модуля. Розташований біля роз'ємів USB3.
 - **“Battery 6.2V-24V”:** Гвинтові клеми або аналогічний роз'єм для підключення зовнішнього джерела живлення в діапазоні 6.2В-24В, що забезпечує гнучкість у виборі джерела живлення. Розташований у верхній центральній частині плати.
 - Навколо цих роз'ємів розташовані компоненти, що відповідають за стабілізацію та фільтрацію живлення, як описано в підрозділі 2.2.
5. **Інтерфейси Ethernet, HDMI, USB Device, SD Card:**
- **Ethernet:** Роз'єм RJ45 для дротового мережевого підключення.

- **HDMI:** Роз'єм для підключення зовнішнього дисплея.
 - **USB Device (Type-C):** Роз'єм USB Type-C, який може використовуватися як для живлення, так і для підключення пристрою в режимі USB-пристрою (наприклад, для завантаження ОС або дебагування).
 - **SD Card:** Слот для MicroSD-карти, що служить для зберігання операційної системи та даних.
6. **M.2 M Key:** Роз'єм M.2 M Key розташований у нижній правій частині плати. Це дозволяє підключати високошвидкісні NVMe SSD або інші сумісні M.2 модулі (наприклад, 4G/5G модеми), значно розширюючи можливості пристрою.
7. **Інші компоненти:** Інші пасивні компоненти (резистори, конденсатори, індуктивності) та активні мікросхеми (стабілізатори, логічні елементи, аудіокодек) розташовані по всій платі відповідно до їхніх функціональних блоків та вимог до трасування сигналів. Вони, як правило, розміщуються якомога ближче до компонентів, з якими вони взаємодіють, для мінімізації довжини доріжок та зменшення перешкод.

Висновок до розділу 2.3

Компоновка друкованої плати виконана з урахуванням оптимального розміщення компонентів для досягнення високої функціональності та надійності. Центральне розташування процесорного модуля та грамотне розміщення високошвидкісних інтерфейсів, таких як PCIe, HDMI та USB 3.0, є ключовим для забезпечення цілісності сигналу. Інтегровані рішення для живлення та захисту, а також підтримка широкого спектру периферійних

інтерфейсів, роблять цю плату гнучким та потужним рішенням для різних вбудованих застосувань. Цей 3D вигляд наочно демонструє результати етапу розробки принципової електричної схеми та є основою для подальшого виробництва.

3.4 Розробка корпусу

Корпус є важливою складовою будь-якого електронного пристрою, оскільки забезпечує механічний захист внутрішніх компонентів від впливу зовнішнього середовища, пилу, вологи та механічних пошкоджень. Okрім захисної функції, корпус визначає ергономіку, зручність експлуатації, а також сприяє ефективному розміщенню та охолодженню елементів системи. Якісно спроектований корпус дозволяє забезпечити надійність, довговічність і безпеку роботи пристрою в різних умовах.

Для розробки корпусу було використано програмне забезпечення SolidWorks[36]. Ця система автоматизованого проектування (CAD) дає змогу створювати тривимірні моделі, виконувати віртуальну збірку всіх компонентів, перевіряти їхню сумісність і оптимізувати конструкцію ще до виготовлення фізичного зразка. SolidWorks дозволяє швидко вносити зміни в проект, генерувати креслення для виробництва та проводити базовий аналіз міцності, що значно підвищує якість і точність розробки корпусу.

3.4.1 Деталі корпусу

1. Корпус

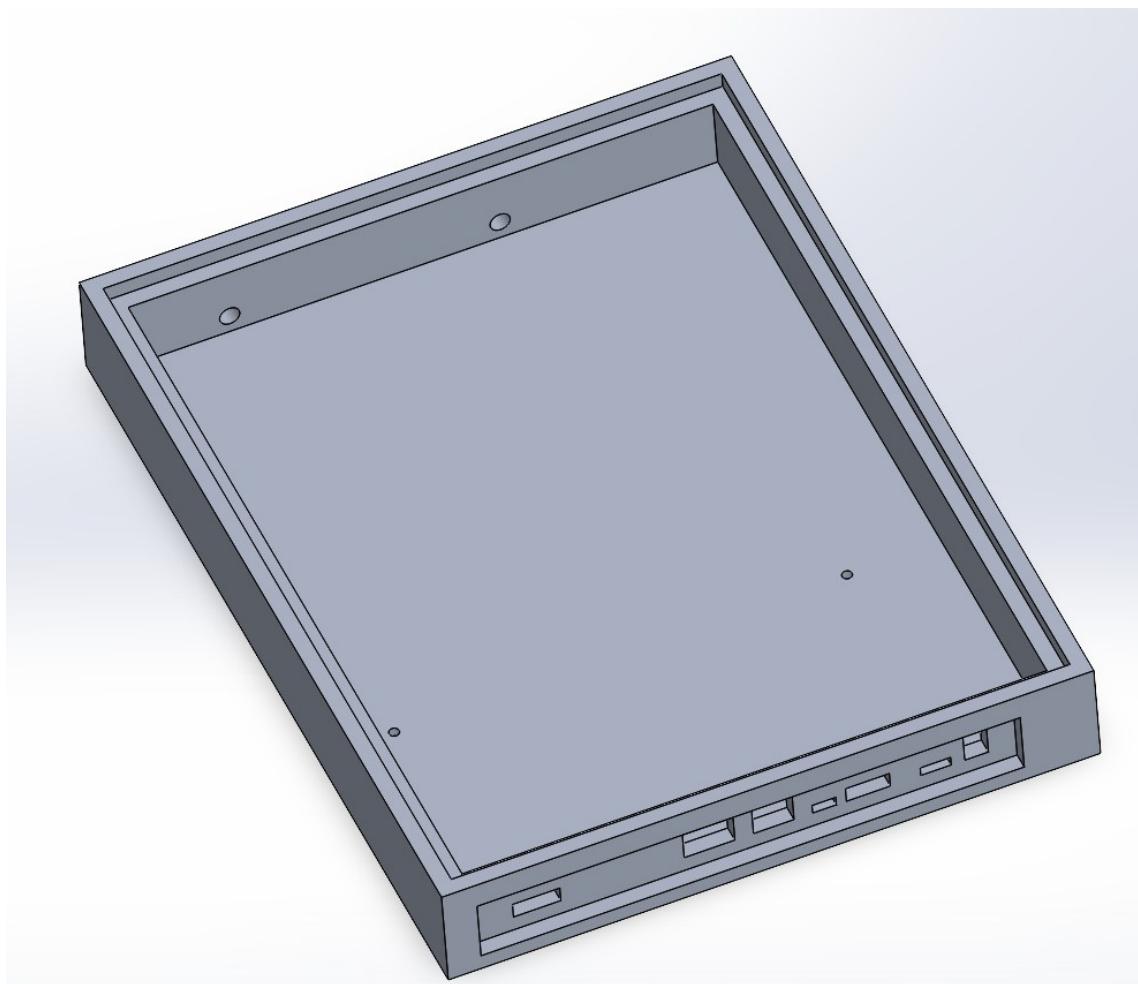


Рис 2.4.1. 3Д вигляд боксу

2. Захисна кришка з органічного скла

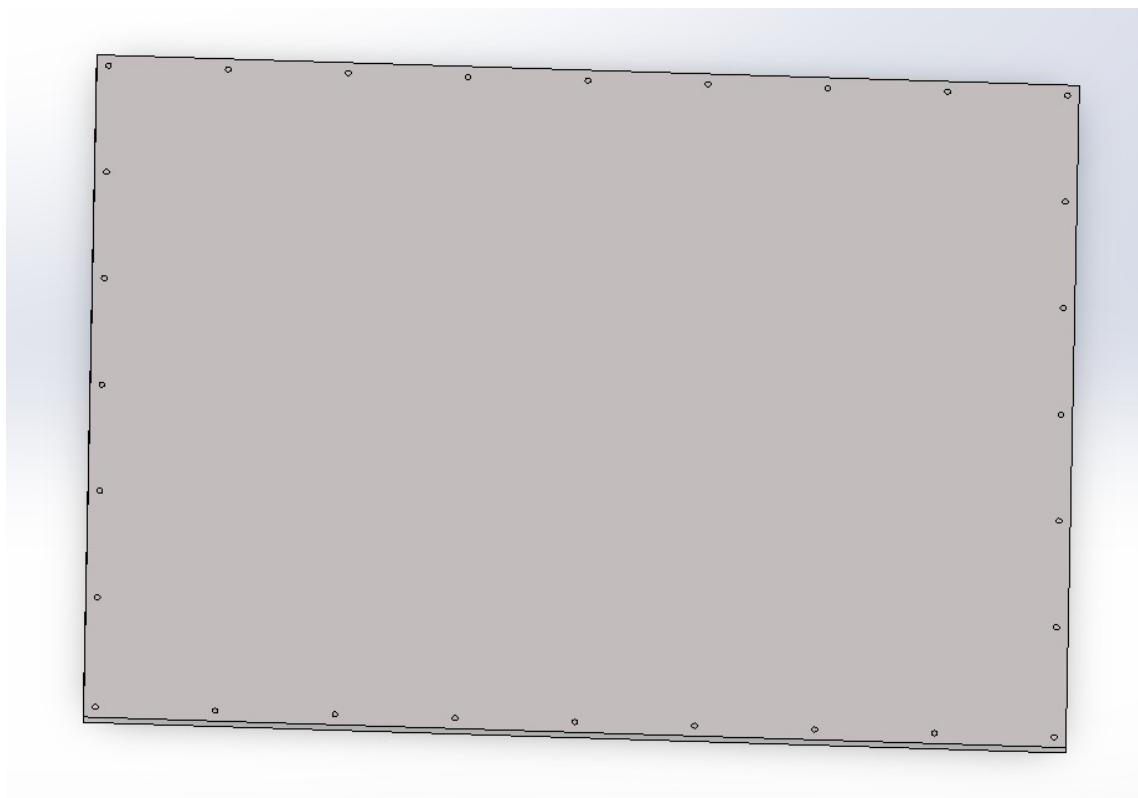


Рис 2.4.2. Захист екрану

3. Захисна кришка роз'ємів

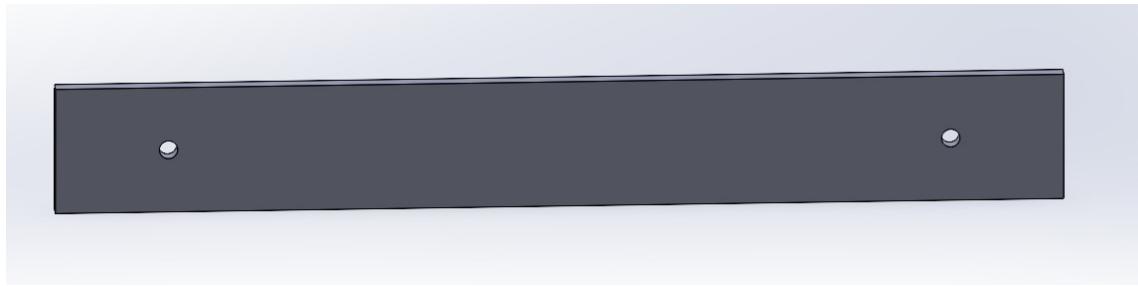


Рис 2.4.3. Захист роз'ємів

Висновок по розділу 2.4

У цьому підрозділі було розглянуто процес проєктування корпусу пристрою, визначено основні вимоги до його конструкції та обґрунтовано

вибір програмного забезпечення для 3D-моделювання. Використання SolidWorks дозволило створити ергономічний, захищений і технологічний корпус, що забезпечує надійне розміщення всіх компонентів системи та сприяє їхній безпечної експлуатації. Розроблені деталі корпусу відповідають вимогам міцності, зручності обслуговування та естетики, що є важливими для подальшого виготовлення та впровадження пристрою.

3.5 Висновок по розділу 2

У другому розділі дипломної роботи було розглянуто процес розробки автоматизованого портативного комплексу виявлення та аналізу радіосигналів (АПКВАР), що має на меті забезпечення надійного збору, обробки та збереження інформації в умовах відсутності стаціонарної інфраструктури.

На основі попереднього аналізу технічних вимог, прикладних сценаріїв використання та сучасних технологічних можливостей, було сформовано структурну схему комплексу, яка забезпечує логічну взаємодію основних компонентів: SDR-модуля для прийому та передачі радіосигналів, обчислювального ядра, сенсорного інтерфейсу, накопичувача даних, GPS-модуля, елементів живлення та бездротових модулів зв'язку. Розроблена схема дозволяє реалізувати гнучку та адаптивну архітектуру, орієнтовану на модульальність і масштабованість системи.

Особливу увагу було приділено підбору елементної бази, що ґрунтувався на критеріях енергоефективності, продуктивності, сумісності та наявності відкритого програмного забезпечення. Як обчислювальну платформу обрано Raspberry Pi Compute Module 4, який забезпечує достатню потужність для

виконання задач аналізу сигналів та зручну інтеграцію з іншими модулями. Для реалізації прийому та обробки радіосигналів обрано BladeRF 2.0 micro хA4 — як оптимальне рішення за критеріями частотного діапазону, якості обробки сигналу та підтримки професійного ПЗ.

Було розглянуто і обґрунтовано вибір інших критичних компонентів: GPS-модуля NEO-6M, SSD-накопичувача, антенного комплексу, акумуляторної системи живлення. Усі ці елементи забезпечують повну автономність, стабільність та функціональність роботи пристрою в польових умовах.

Таким чином, розділ 2 демонструє всебічно продуману технічну концепцію та обґрунтований підхід до побудови АПКВАР. Визначена структура та складові системи створюють надійну основу для подальшої розробки, тестування і практичного впровадження пристрою. Отримані результати дозволяють впевнено перейти до наступних етапів — прототипування, оптимізації та впровадження комплексу в реальні умови експлуатації.

4 МЕТОДОЛОГІЯ РОБОТИ АПКВАР

У цьому розділі розглядаються основні підходи, інструменти та принципи, що використовуються при розробці та дослідженні автоматизованої програмно-керованої варіантної радіосистеми (АПКВАР). Описано вибір апаратних і програмних засобів, методи збору, обробки та аналізу даних, а також обґрунтовано застосування сучасних технологій, таких як SDR і алгоритми штучного інтелекту. Особлива увага приділяється практичним аспектам реалізації системи, що забезпечують її гнучкість, масштабованість і надійність у різних умовах експлуатації.

4.1 Приймання радіосигналів за допомогою технології SDR

Загальні принципи роботи SDR

Програмно-визначуване radio (SDR, Software-Defined Radio) є новітньою концепцією в галузі радіозв'язку, що дозволяє виконувати більшість функцій традиційного радіоприймача програмними засобами. Основна ідея полягає у перетворенні аналогового сигналу в цифровий одразу після приймання та подальшій обробці цього сигналу програмно, що забезпечує виняткову гнучкість системи.

Сучасні SDR-системи складаються з високошвидкісного аналого-цифрового перетворювача (АЦП), цифрового сигнального процесора (DSP), комп’ютера або мікроконтролера та програмного забезпечення для обробки сигналів. Це дозволяє змінювати параметри приймання та обробки сигналу, такі як частота, тип модуляції, смуга пропускання та інші, без втручання в апаратну частину системи.

У праці [37] підкреслюється, що одним з головних викликів при реалізації SDR є необхідність використання надшвидких процесорів, здатних обробляти в реальному часі великі обсяги цифрової інформації. Також важливу роль відіграє точність АЦП та вибір аналогового фронтенду — першого каскаду приймання сигналу.

Апаратні платформи SDR

Найбільш пошиrenoю платформою для побутового та дослідницького використання є RTL-SDR — недорогий USB-тюнер на базі мікросхеми RTL2832U. Цей пристрій здатен приймати сигнали в діапазоні від 24 МГц до 1766 МГц. Завдяки відкритим драйверам та підтримці великої кількості програмного забезпечення (наприклад, SDR# або GQRX), RTL-SDR знайшов широке застосування у багатьох проектах.

У дослідженні [38] було описано використання RTL-SDR на вбудованій Linux-системі для прийому сигналів авіаційної служби спостереження ADS-B. Автори навели практичні аспекти конфігурації та прийому, що є цінним для розробників портативних систем спостереження.

Іншою пошиrenoю платформою є HackRF One — одноканальний SDR трансивер з діапазоном частот від 1 МГц до 6 ГГц. Його відкритий дизайн дозволяє глибоку модифікацію як на рівні прошивки, так і на рівні схеми пристрою, що робить його привабливим для науковців і розробників військових рішень.

Техніки приймання слабких сигналів

Однією з переваг SDR є можливість ефективного приймання слабких сигналів за умов наявності сильних перешкод. У роботі [39] досліджено використання двоелементного антеного масиву у поєднанні з адаптивними алгоритмами цифрової обробки сигналів для покращення співвідношення сигнал/шум. Запропонована система продемонструвала здатність до просторового фільтрування сигналів та зменшення впливу завад.

Цей підхід особливо актуальний у військових системах зв'язку, де часто необхідно приймати сигнали зі слабкою потужністю на фоні активного радіоелектронного протиборства.

SDR як засіб тестування вразливостей

Завдяки широкому діапазону частот та можливості генерувати сигнали, SDR використовується також для тестування захищеності радіосистем. У статті [40] представлено реалізацію атаки типу spoofing на GPS-приймач з використанням SDR-пристрою. За допомогою генерації синтетичних GPS-сигналів дослідники змогли обдурити навігаційний модуль пристрою Android, змусивши його визначити фальшиве місце положення.

Цей приклад показує як SDR може застосовуватись не лише для приймання сигналів, а й для їх аналізу, генерації та модифікації з метою підвищення безпеки систем навігації.

Інтеграція SDR з елементами штучного інтелекту

Сучасні дослідження активно впроваджують машинне навчання в SDR-системи. У публікації [41] описано систему інтелектуального аналізу сигналів, що здатна автоматично визначати тип модуляції вхідного сигналу за

допомогою нейромережі. Для розгортання системи було використано хмарну інфраструктуру Microsoft Azure, що забезпечило масштабованість та високу продуктивність.

Інтеграція алгоритмів штучного інтелекту дозволяє автоматизувати процес аналізу радіочастотного спектру та виявлення аномалій, що є цінним у контексті радіоелектронної боротьби або моніторингу ефіру в реальному часі.

Приклад застосування: аналіз Wi-Fi сигналів

Технологія SDR також може використовуватись для вивчення сигналів побутових бездротових систем. У дослідженні [42] описано методику аналізу потужності Wi-Fi сигналу при наявності різних фізичних перешкод. Було встановлено, що тіло людини значною мірою впливає на стабільність з'єднання, особливо при використанні спрямованих антен.

У статті також було вивчено ефективність односторонньої передачі даних в умовах обмеженого покриття, що може бути корисним у створенні енергоефективних мереж для IoT-пристроїв.

Висновки до розділу

SDR є потужним інструментом для побудови гнучких і адаптивних систем зв'язку. Завдяки програмній реалізації основних функцій приймання та обробки сигналу, SDR дає можливість створювати пристрой з широким спектром можливостей: від простого радіоприймача до складної системи аналізу ефіру з використанням штучного інтелекту. Застосування SDR у військових, наукових та побутових системах підтверджує його універсальність та перспективність.

4.2 Приймання та обробка радіосигналів за допомогою технології SDR

Загальні принципи роботи SDR

Програмно-визначуване радіо (SDR, Software-Defined Radio) — це концепція, яка передбачає реалізацію основних функцій радіоапаратури за допомогою програмного забезпечення. Традиційні радіоприймачі використовують апаратні фільтри, модулятори та демодулятори. У SDR більшість цих функцій виконується програмно після оцифрування сигналу за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Основні складові SDR-системи:

- **Аналоговий фронтенд:** приймає сигнал з ефіру і подає його на АЦП;
- **АЦП:** перетворює аналоговий сигнал у цифрову форму;
- **Цифровий сигнальний процесор (DSP)** або **ЦП/ГП** комп'ютера: виконує фільтрацію, демодуляцію, декодування;
- **Програмне забезпечення:** забезпечує візуалізацію, обробку та збереження сигналів.

Програмне забезпечення для обробки SDR-сигналів

Для повноцінної роботи з SDR використовуються різні програми, які мають широкий функціонал і застосовуються для різних задач: спостереження за спектром, демодуляції, запису, декодування цифрових протоколів, аналізу тощо.

SDR#[43] — популярна Windows-програма для роботи з RTL-SDR:

- Спектр та waterfall;

- AM, FM, SSB, CW, WFM, NFM демодуляція;
- Плагіни: декодування AIS, ADS-B, TETRA, DMR тощо;
- Запис сигналів у WAV/IQ форматах;
- Підтримка вбудованих фільтрів, зміщення частоти, автоналаштування.

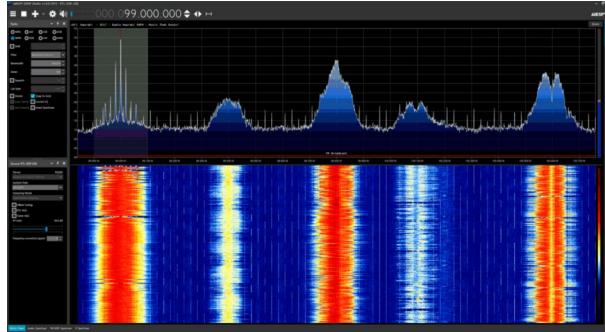


Рис 3.1. SDR#

GQRX[44] — кросплатформний SDR-інтерфейс на базі GNU Radio для Linux/macOS:

- Графічний інтерфейс з FFT/Waterfall;
- AM/FM/SSB/CW/RAW демодуляція;
- Запис аудіо та IQ-даних;
- Підтримка RTL-SDR, HackRF, USRP, BladeRF, PlutoSDR тощо.

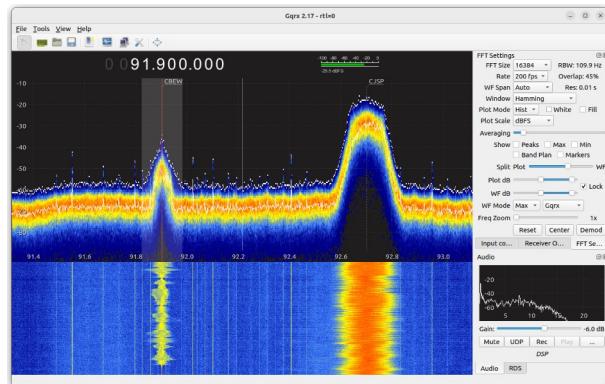


Рис 3.2. GQRX

GNU Radio[45] — фреймворк для створення SDR-додатків у вигляді графічного середовища (GRC):

- Побудова потоку обробки сигналу з блоків: джерело, фільтр, демодулятор, декодер;
 - Підтримка мови Python для користувачької логіки;
 - Застосовується для наукових, військових, комерційних задач;
 - Можливість симуляції складних систем (MIMO, фазовий масив, модуляція QAM, OFDM тощо).

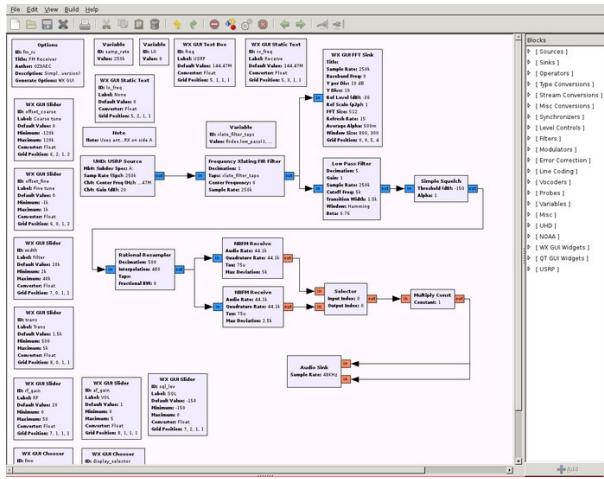


Рис 3.3. GNU Radio

(URH)

Universal Radio Hacker[46] — інструмент для аналізу цифрових протоколів:

- Захоплення, перегляд, декодування і повторна передача сигналів;
 - Аналіз бітових послідовностей, протоколів (манчестер, NRZ, ASK, OOK);
 - Підтримка багатьох SDR пристройів.

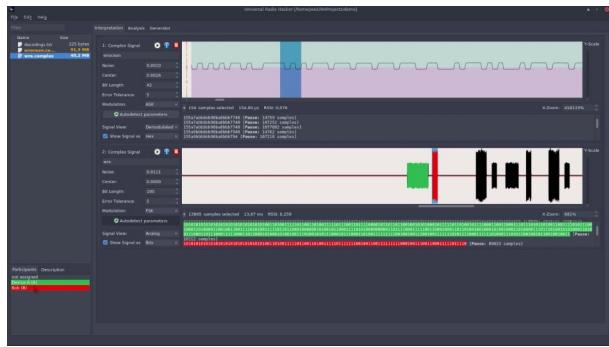


Рис 3.4. Universal Radio Hacker

Inspectrum[47] — програма для аналізу IQ-сигналів:

- Розширене відображення спектру та фазового простору;
- Можливість розмітки імпульсів і виявлення манчестерського кодування;
- Застосовується для реверс-інжинірингу радіопротоколів.

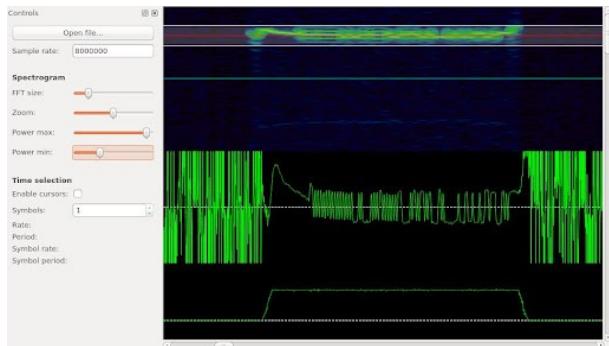


Рис 3.5. Inspectrum

SDR++[48] — легкий, мультиплатформний SDR клієнт:

- Працює під Windows, macOS, Linux;
- Підтримка декількох SDR одночасно;
- Швидкий спектрограф, підтримка плагінів.

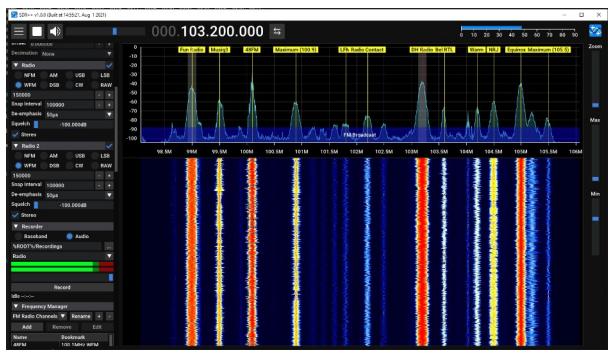


Рис 3.6. SDR++

SigDigger[49] — аналітична SDR-програма з підтримкою широкого спектру сигналів:

- FFT, демодуляція, запис;
- Підтримка векторного аналізу та власних демодуляторів.

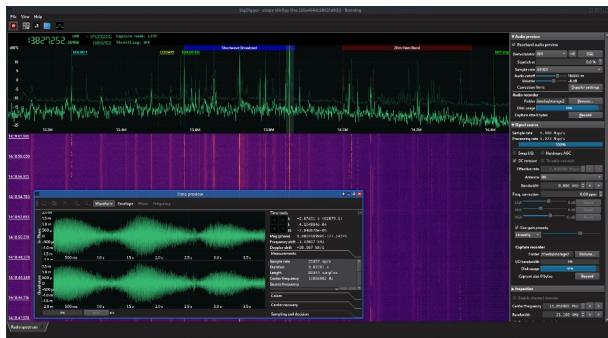


Рис 3.7. SigDigger

Audacity та інші звукові редактори

Для аналізу та обробки демодульованого сигналу у форматі WAV використовують звукові редактори, наприклад **Audacity[50]**:

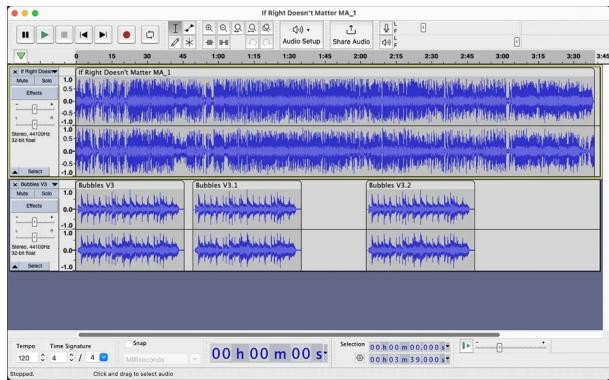


Рис 3.8. Audacity

- Розгортка сигналу по часу;
- Спектральний аналіз;
- Виділення, вирізання, фільтрація підсигналів.

Етапи обробки сигналу в SDR

Обробка сигналу за допомогою SDR включає наступні етапи:

1. Приймання сигналу:

- Вибір частоти, ширини смуги;
- АЦП перетворення (IQ-дані).

2. Попередня обробка:

- Фільтрація (низькочастотна, смуговапропускна);
- Усунення зміщення частоти, нормалізація амплітуди.

3. Демодуляція:

- Залежно від типу сигналу: AM/FM/SSB/FSK/QAM/PSK;
- Витягнення корисної інформації (аудіо, дані).

4. Декодування:

- Інтерпретація бітових потоків у пакети/протоколи;
- Вивід у текстовому або графічному вигляді.

5. Аналіз і зберігання:

- Збереження IQ-даних або аудіо для подальшої обробки;
- Побудова спектрограм, логів, діаграм.

Обробка сигналів, отриманих через SDR, є гнучким, адаптивним процесом, що може бути автоматизований і масштабований. Завдяки розвинутому набору інструментів, користувач може аналізувати ефір у реальному часі, виявляти цифрові сигнали, тестиувати протоколи, а також здійснювати зворотну інженерію. SDR — це інструмент не лише для спостереження, а й для глибокого розуміння принципів роботи сучасних радіосистем.

4.3 Висновок по розділу 3

У цьому розділі було розглянуто ключові методологічні підходи до розробки та дослідження автоматизованих програмно-керованих варіантних радіосистем із використанням SDR. Описано апаратні платформи, програмне забезпечення та сучасні техніки приймання й обробки сигналів, включаючи інтеграцію алгоритмів штучного інтелекту. Наведені приклади практичного застосування SDR у різних сферах — від аналізу Wi-Fi до тестування вразливостей GPS — демонструють універсальність і гнучкість цієї технології. Використання SDR забезпечує масштабованість, адаптивність і можливість швидкої модернізації систем зв’язку, що є критично важливим для сучасних наукових, військових та побутових задач. Таким чином, SDR

виступає фундаментальним інструментом для побудови інноваційних радіосистем нового покоління.

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИПРОБУВАННЯ

5.1 Прийом радіосигналу аналогової рації

Обладнання:

- Джерело сигналу - рація Baofeng
- Приймач сигналу - BladeRF
- Обробник сигналу - GNU Radio

Baofeng **ключові технічні характеристики та функціонал** Більшість моделей Baofeng мають схожі базові характеристики, але є і відмінності. Зазначте їх узагальнено, а потім можете додати приклади.



Рис 4.1. Рація Baofeng

Діапазони частот:

- Переважно **дводіапазонні** (Dual Band) рації, що працюють у **VHF** (136-174 МГц) та **UHF** (400-520 МГц) діапазонах. Це дозволяє використовувати їх для різних цілей та з різними типами інших радіостанцій.

- Деякі моделі підтримують також прийом FM-радіо (для розваги).
- **Вихідна потужність:** Зазвичай від 1 до 8 Вт. Потужність впливає на дальність зв'язку. Важливо зазначити, що рекламиована потужність не завжди відповідає фактичній, але навіть 5 Вт достатньо для більшості аматорських та побутових потреб.
- **Модуляція: FM (частотна модуляція)** – стандарт для портативних раций, забезпечує гарну якість звуку.
- **Кількість каналів:** Зазвичай від 128 до 200 каналів, що програмуються, дозволяючи зберігати багато різних частот.
- **Функціональні особливості:**
- **Два канали одночасно (Dual Watch/Dual Receive):** Можливість одночасного моніторингу двох частот.
- **VOX (Voice Operated eXchange):** Активування передачі голосом, без натискання кнопки РТТ.
- **CTCSS/DCS (Tone Squelch):** Кодовий шумоподавлювач, що дозволяє фільтрувати небажані сигнали і чути тільки абонентів своєї групи.

1. Налаштування програми GNU Radio для прослуховування:

- Встановлюються параметри, такі як частота (на прикладі 446.13 МГц) та частота дискретизації (Sample Rate).
- Посилення (Gain) встановлено на мінімальне значення (-1).
- Використовується блок Osmocom Source з параметрами, адаптованими для конкретного SDR-приймача (BladeRF).
- Для візуалізації спектра використовується блок GUI Sink.

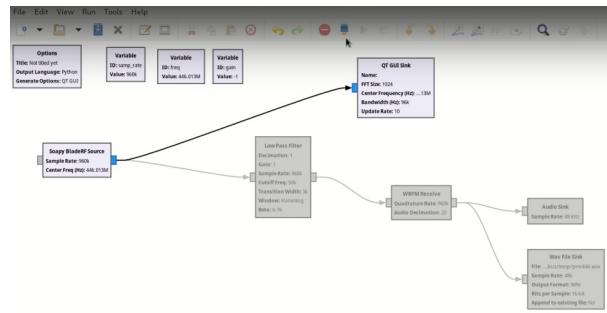


Рис 4.2. Структура модуля цифрової обробки для графічного відображення

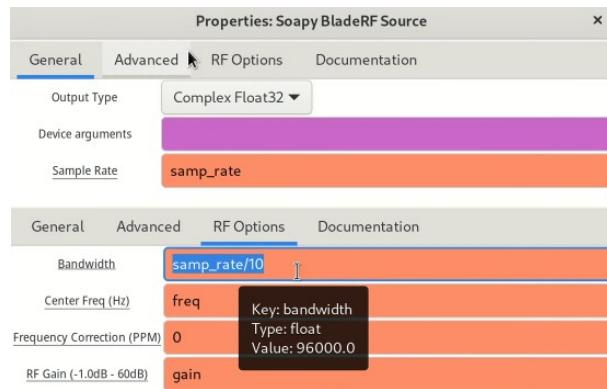


Рис 4.3. Параметри BladeRF

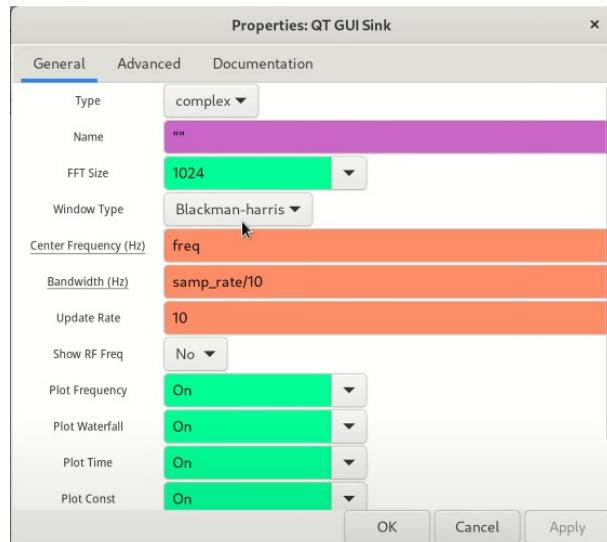


Рис 4.4. Параметри графічного відображення

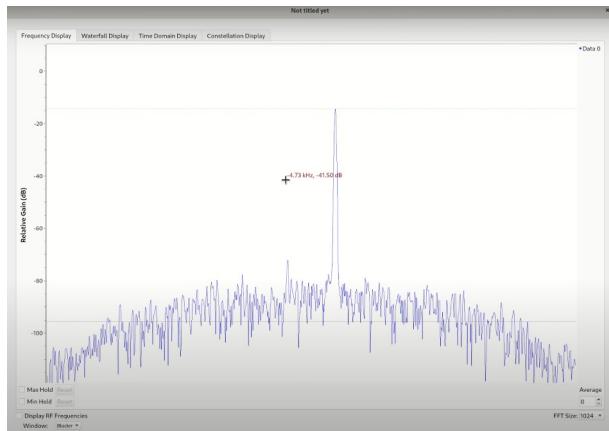


Рис 4.5. Частотне відображення прийнятого сигналу

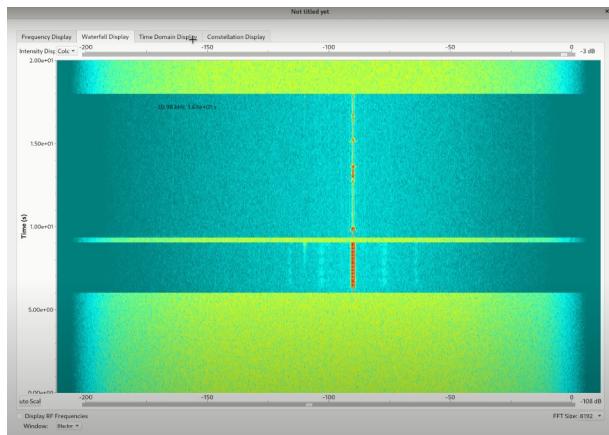


Рис 4.6. Водопадне відображення прийнятого часу

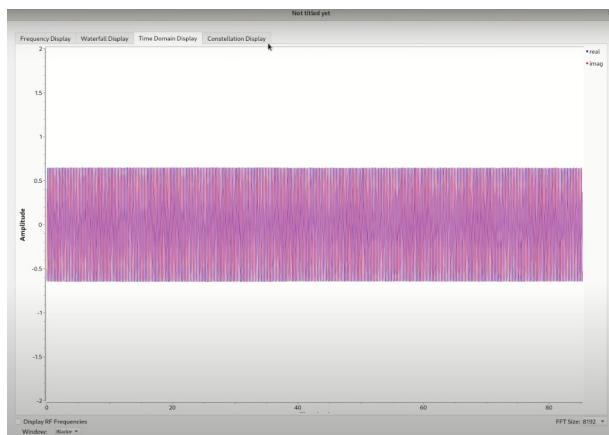


Рис 4.7. Амплітудне відображення прийнятого часу

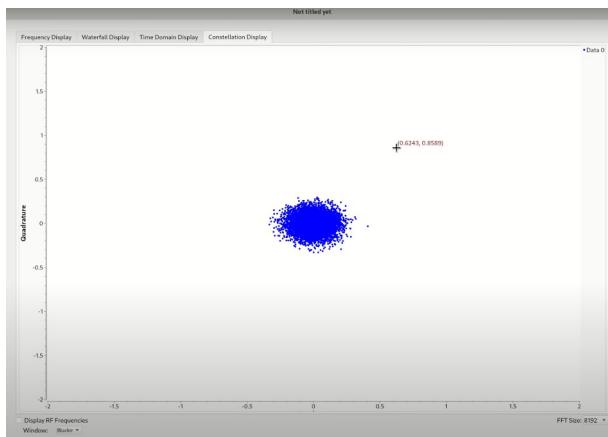


Рис 4.8. Відображення сузір'ям прийнятого сигналу

2. Налаштування для прослуховування через аудіосистему комп'ютера:

- Для виведення звуку на комп'ютер необхідно додати блоки обробки аудіо.
- Встановлення фільтра низьких частот (Low Pass Filter) для виділення потрібного каналу.
 - Встановлення параметри фільтра: Sample Rate, Cutoff Frequency (на прикладі 50 кГц) та Transition Width (на прикладі 3 кГц).
- Додаємо блок FM Demod для демодуляції FM-сигналу.
 - Параметри FM Demod: Sample Rate та Audio Decimation.
- Використовуємо блок Audio Sink для виведення звуку на аудіосистему.
 - Встановлення Sample Rate аудіовиходу (на прикладі 48 кГц).

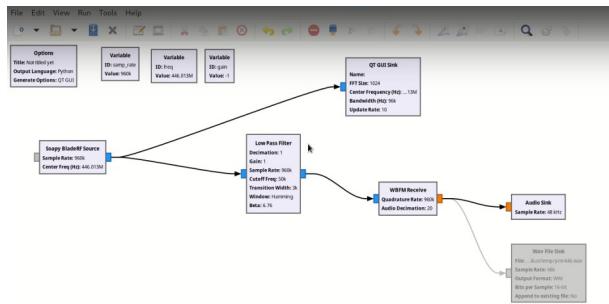


Рис 4.9. Структура модуля цифрової обробки для звукового відображення

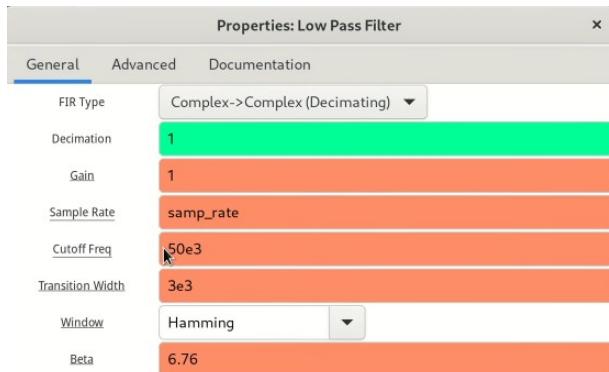


Рис 4.10. Налаштування фільтра низьких частот

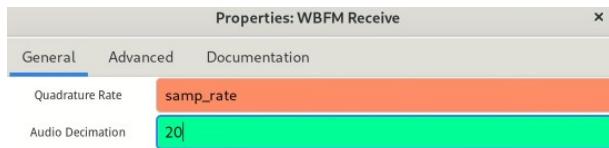


Рис 4.11. Налаштування блоку демодуляції FM-сигналу

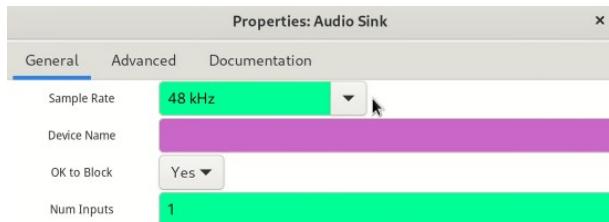


Рис 4.12. Налаштування блоку виводу аудіо

3. Запис ефіру у файл:

- Для запису ефіру блок Audio Sink вимикається.
- Замість нього вмикається блок Wave File Sink.
- Вказується шлях до файлу для збереження, кількість каналів (1 для моно) та Sample Rate (48000 Гц).

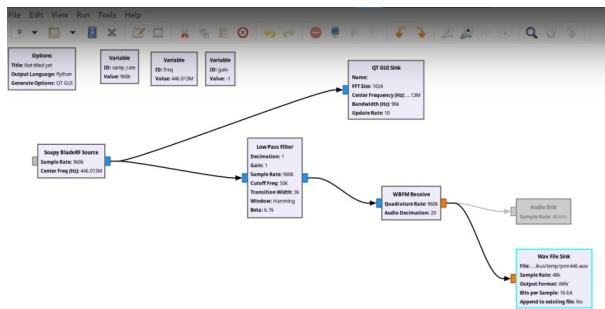


Рис 4.13. Структура модуля цифрової обробки для запису в файл

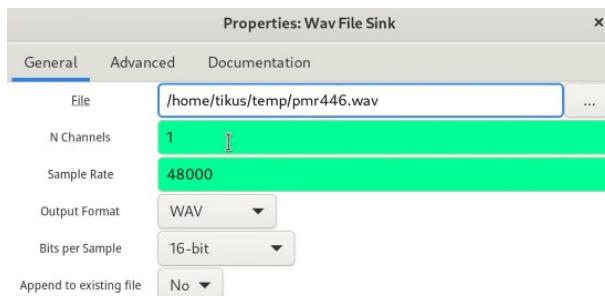


Рис 4.14. Налаштування блоку запису

Висновок

У ході експерименту було успішно прийнято та оброблено аналоговий радіосигнал за допомогою SDR-приймача BladeRF та програмного забезпечення GNU Radio. Проведено налаштування параметрів прийому, демодуляції та виводу аудіосигналу, а також здійснено запис ефіру у файл. Отримані результати підтверджують можливість використання SDR для

аналізу та обробки аналогових радіосигналів, а також демонструють гнучкість та функціональність сучасних цифрових систем радіоприйому.

Цікавий задум! Якщо ми плануємо експеримент з прийому супутниковых зображень за допомогою **WebSDR**, наш план буде дещо відрізнятися від того, що показано у відео, оскільки ми не будемо фізично підключати обладнання та встановлювати спеціалізоване ПЗ для керування радіо. WebSDR вже надає нам доступ до радіо з антеновою.

Ось адаптований план експерименту:

5.2 Прийом супутниковых зображень

Обладнання

- **WebSDR[51]**: який має можливість прийому на частотах метеорологічних супутників. Важливо, щоб обраний WebSDR мав **антену Double Cross** або іншу антенну з круговою поляризацією для кращого прийому.
- **Програмне забезпечення:**
 - **SDR#** (SDRSharp) – ці програми не підключатимуться до WebSDR напряму, але ми використовуватимемо їх для **демодуляції аудіосигналу** з WebSDR.
 - **LRPTDecoder[52]** – для декодування сигналу.
 - **Orbitron** або **Gpredict** – програми для відстеження супутників і прогнозування їх проходження над нашим місцезнаходженням.
 - **Віртуальний аудіокабель VB-Cable[53]** – програма для перенаправлення аудіо з браузера (де працює WebSDR) до програм декодування (LRPTDecoder).

- **Спутник:**

- **NOAA 15, 18, 19[54]:**

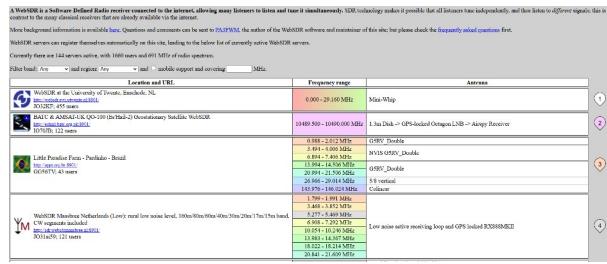


Рис 4.15. WebSDR

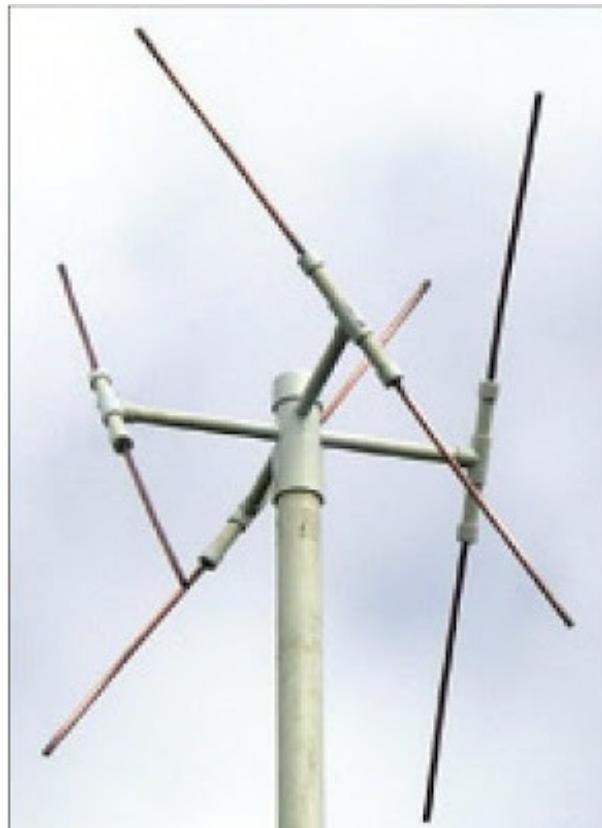


Рис 4.16. Антена Double Cross



Рис 4.17. Погодний супутник NOAA 15

1. Підключення до WebSDR та захоплення сигналу

1. **Вибір WebSDR:** Ми знайдемо відповідний WebSDR. Шукатимемо в пошуку за запитом “WebSDR 137 MHz” або “WebSDR NOAA Meteor”. Переконаємося, що він активний та має хорошу антенну.
2. **Відстеження супутника:** Запустимо **Orbitron[55]**. Введемо наші координати та додамо TLE-дані для NOAA 15/18/19 . Програма покаже нам час проходження супутників над зоною покриття WebSDR.
3. **Налаштування WebSDR:** За кілька хвилин до проходження супутника налаштуємо частоту WebSDR на відповідну частоту супутника 137.9125 МГц . Використовуватимемо **режим NFM** (narrowband FM) для NOAA та **широкосмуговий FM (WFM)** або **пряме захоплення IQ-сигналу** (якщо WebSDR це підтримує) для Meteor M2.
4. **Запис аудіосигналу:** Під час проходження супутника записуватимемо аудіосигнал з WebSDR. Якщо WebSDR має функцію запису, використаємо її. В іншому випадку, нам потрібно буде перенаправити аудіо з браузера через **Віртуальний аудіокабель** в програму запису аудіо Audacity.

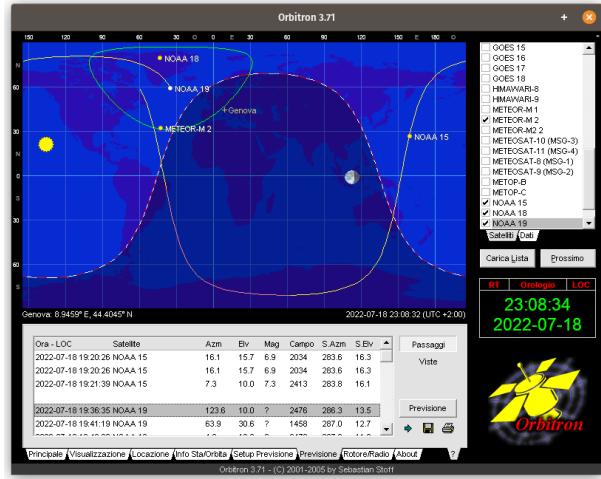


Рис 4.18. Orbitron

2. Декодування зображення

- Відкриємо LRPTDecoder.
- Якщо ми записували аудіофайл, конвертуємо його в потрібний формат за допомогою SDR#.
- Завантажимо файл до LRPTDecoder.
- Запустимо процес демодуляції та декодування. LRPTDecoder створить зображення.

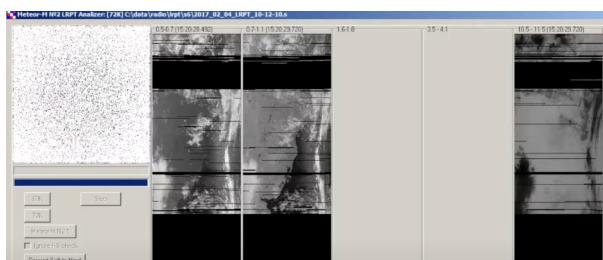


Рис 4.19. Декодований сигнал за допомогою LRPTDecoder

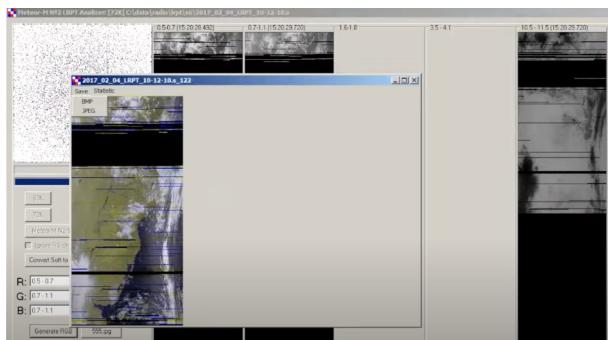


Рис 4.20. Перегляд результату в RGB

Висновок:

У ході експерименту було успішно прийнято та декодовано супутникове зображення за допомогою WebSDR та спеціалізованого програмного забезпечення. Використання WebSDR дозволило отримати сигнал без необхідності власного радіообладнання, а програмні інструменти забезпечили обробку та декодування даних у зображення. Результати підтверджують ефективність дистанційного прийому супутниковых сигналів і демонструють доступність сучасних SDR-технологій для аматорських досліджень у сфері радіозв'язку та супутникової метеорології.

5.3 Висновок по розділу 4

У цьому розділі було розглянуто практичні аспекти роботи з SDR (Software Defined Radio) для прийому та обробки аналогових і супутниковых радіосигналів. Проведені експерименти показали, що SDR-платформи забезпечують гнучкість, універсальність і доступність для дослідників та аматорів. Відсутність необхідності у спеціалізованому апаратному забезпеченні (завдяки WebSDR) значно спрощує процес отримання та аналізу сигналів. Використання сучасного програмного забезпечення дозволяє не

лише приймати сигнали, а й виконувати їхню демодуляцію, декодування та подальшу обробку. Таким чином, SDR-технології відкривають широкі можливості для експериментів у сфері радіозв'язку, навчання та досліджень, а також сприяють популяризації радіоелектроніки серед широкого кола користувачів.

ВИСНОВОК

У ході виконання дипломної роботи було реалізовано повноцінний цикл розробки автоматизованого портативного комплексу для виявлення та аналізу радіосигналів, призначеного для використання у важкодоступних або екстремальних умовах. Сучасні виклики в сфері мобільних технологій, інформаційної безпеки та автономної роботи систем зумовили потребу у створенні саме такого рішення, яке б об'єднувало функціональність, компактність, енергоефективність та відкритість.

У межах дослідження проведено глибокий аналітичний огляд сучасних SDR-пристроїв, що показав широкий спектр доступних інструментів для прийому й аналізу сигналів у радіочастотному діапазоні від кількох кГц до кількох ГГц. Проаналізовані моделі HackRF One з PortaPack H4, LibreSDR Pluto, Amator SDR, BladeRF 2.0 micro та інші підтвердили тенденцію до мініатюризації, розширення функціоналу, збільшення частотного діапазону та використання відкритого програмного забезпечення.

Було сформовано вимоги до майбутнього пристрою, зокрема:

- робота в широкому частотному діапазоні (мінімум 1 МГц – 6 ГГц),
- наявність GPS-модуля для геоприв’язки та синхронізації,
- сенсорного дисплея для взаємодії з користувачем,
- компактного накопичувача для збереження даних,
- можливості бездротової комунікації (Wi-Fi, Bluetooth),
- енергонезалежної роботи завдяки потужному акумулятору,
- відкритості як апаратної, так і програмної частини.

У межах інженерної частини було виконано:

- розробку структурної та принципової електричної схем пристрою;
- підбір оптимальної елементної бази, що включає Raspberry Pi Compute Module 4 як обчислювальне ядро, BladeRF micro xA4 як SDR-приймач, GPS-модуль NEO-6M, SSD-накопичувач, Li-Ion акумуляторну систему живлення та інші компоненти;
- створення 3D-моделі корпусу, адаптованого до розміщення обраних компонентів та роботи в польових умовах;
- обґрунтування вибору антенного комплексу залежно від типу задач і діапазонів сигналів.

Застосований підхід до відкритої архітектури дозволяє гнучко адаптувати комплекс до конкретних вимог замовника або сценаріїв використання. Це забезпечує не лише прозорість роботи системи, а й можливість незалежного аудиту безпеки, адаптації ПЗ під специфічні протоколи або навіть модернізації апаратної частини.

Важливою перевагою є автономність пристрою — завдяки оптимізованому енергоспоживанню, компактній конструкції та можливості заряджання в польових умовах (зокрема від автомобільної мережі 12 В), пристрій здатен ефективно працювати без стаціонарної інфраструктури тривалий час.

Таким чином, в результаті дипломного проекту було створено концепцію, інженерну структуру і обґрунтовану конфігурацію мобільного обчислювального комплексу, здатного ефективно здійснювати виявлення, прийом, аналіз і запис радіосигналів. Такий комплекс має потенціал для

подальшого розгортання як у сфері військового зв'язку та розвідки, так і в цивільних додатках: моніторинг бездротових мереж, наукові дослідження, навчальні проекти.

У перспективі подальший розвиток комплексу може включати:

- реалізацію модуля захоплення відео з аналогових джерел;
- впровадження алгоритмів машинного навчання для автоматичної класифікації сигналів;
- інтеграцію з дронами або іншими мобільними платформами;
- вдосконалення корпусу з урахуванням захисту від вологи, пилу та механічного впливу (IP65 і вище);
- створення модульної версії з можливістю швидкої заміни або розширення функціональності.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що поставлені завдання були повністю реалізовані, а результати роботи відкривають широкі можливості для подальших досліджень і вдосконалення у сфері мобільних радіотехнічних систем.

Список використаних джерел

- [1] HackRF One, [Електронний ресурс] URL:
https://fd24.com.ua/ua/p1044872164-sdr-radiostantsiya-antennami.html?source=merchant_center&gad_source=1&gad_campaignid=16695681573&gbraid=0AAAAACqF10_-rY4lJZlaJmtpxI3HFCwSQ&gclid=CjwKCAjw56DBBhAkEiwAaFsG-tMrTVbThssU7Zpa5kQyvDk9m0I4ZMkaidrQvP96XgwxpQHuhkZQ7RoCglAQAvD_BwE
- [2] LibreSDR, [Електронний ресурс] URL:
<https://fd24.com.ua/ua/p2465955107-sdr-radiostantsiya-antennami.html>
- [3] Приймач 1.10D DSP SDR, [Електронний ресурс] URL:
https://www.joom.com/uk/products/67b2acd0683d8101ba932088?variant_id=67b2acd0683d815eba93208a
- [4] Радіостанція Amator SDR 1 МГц - 6 ГГц., [Електронний ресурс] URL:
https://www.joom.com/uk/products/67ea3b1a35422d011b0f5a93?variant_id=67ea3b1a35422dbc1b0f5a95
- [5] Malahit-DSP2 SDR, [Електронний ресурс] URL:
https://www.joom.com/uk/products/67399c645aa1e901d90ed87c?variant_id=67399c645aa1e9c2d90ed87e
- [6] Види антен, [Електронний ресурс] URL: https://sprotivvg7.com.ua/wp-content/uploads/2023/05/Osnovni-harakterystyky-anten_ukr.pdf
- [7] HackRF-One, [Електронний ресурс] URL:
<https://github.com/dodgymike/hackrf-wiki/blob/master/HackRF-One.md>

[8] RTL-SDR, [Електронний ресурс] URL: <https://www rtl-sdr com/buy-rtl-sdr-dvb-t-dongles/>

[9] LimeSDR Mini, [Електронний ресурс] URL: <https://limemicro com/products/boards/limesdr-mini/>

[10] ADALM-Pluto (PlutoSDR), [Електронний ресурс] URL: <https://wiki.analog.com/university/tools/pluto>

[11] BladeRF 2.0 micro xA4, [Електронний ресурс] URL: <https://selteq com ua/ru/bladerf-2-0/>

[12] Raspberry Pi Compute Module 5 (CM5), [Електронний ресурс] URL: <https://www raspberry pi com/products/compute-module-5>

[13] NVIDIA Jetson Nano, [Електронний ресурс] URL: <https://developer nvidia com/embedded/jetson-nano>

[14] Radxa CM3, [Електронний ресурс] URL: <https://wiki radxa com/CM3>

[15] Banana Pi BPI-CM4, [Електронний ресурс] URL: https://wiki.bananapi.org/Banana_Pi_BPI-CM4

[16] Digitnow USB 2.0 Video Capture Card, [Електронний ресурс] URL: <https://www.amazon.com/Digitnow-Video-Capture-Converter-VHS/dp/B01HEQZ66U>

[17] August VGB100 USB Video Capture Stick, [Електронний ресурс] URL: <https://www.augustint.com/uk/productmsg-103-0.html>

[18] GPS модуль u-blox NEO-6M, [Електронний ресурс] URL: <https://uamper com/products/datasheet/NEO-6.pdf>

- [19] SSD MTS420S, [Електронний ресурс] URL:
<https://hard.rozetka.com.ua/ua/transcend-ts240gmts420s/p436737317/>
- [20] IBM Lenovo Wacom 12.1in, [Електронний ресурс] URL:
<https://www.alancomputech.com/ibm-lenovo-wacom-12-1in-xga-lcd-touch-screen-13n7241-laptop-su5r-12s05as-02x-13n7241.html>
- [21] Waveshare 10.1", [Електронний ресурс] URL:
<https://www.waveshare.com/10.1inch-hdmi-lcd.htm>
- [22] RPi 7" Touchscreen Display, [Електронний ресурс] URL:
<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-touch-display/>
- [23] BOE 10.1" MIPI DSI IPS LCD Touch Screen, [Електронний ресурс] URL:
https://www.panelook.com/TV101WXM-NH0_BOE_10.1_LCM_overview_26806.html
- [24] Типи літій-іонних акумуляторів, [Електронний ресурс] URL:
<https://deps.ua/ua/knowegable-base/reference-information/10591.html#q3-2>
- [25] Літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄), [Електронний ресурс] URL:
<https://deps.ua/ua/katalog/accumulators-batteries.html?f=11928>
- [26] Акумулятор літій-полімерний 10000 mAh, 3.7v, 1260110, [Електронний ресурс] URL: <https://alphapower.com.ua/ua/p1184584341-akkumulyator-litij-polimernyj.html>
- [27] CM4 IO Board, [Електронний ресурс] URL:
<https://www.raspberrypi.com/products/compute-module-4-io-board/>

- [28] Waveshare, [Електронний ресурс] URL:
<https://www.waveshare.com/cm4-io-base-b.htm>
- [29] Seeed Studio, [Електронний ресурс] URL:
<https://www.seeedstudio.com/reComputer-IO-Board-p-5279.html>
- [30] DFRobot Raspberry Pi CM4 IoT Router Carrier Board Mini, [Електронний ресурс] URL: <https://www.dfrobot.com/product-2590.html>
- [31] IP2326 datasheet, [Електронний ресурс] URL:
http://lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2304062030_INJOINIC-IP2326_C2832094.pdf
- [32] AP64501SP-13 datasheet, [Електронний ресурс] URL:
https://lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2108041630_Diodes-Incorporated-AP64501SP-13_C2071517.pdf
- [33] TPD4E05B30 datasheet, [Електронний ресурс] URL:
<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/796048/TI1/TPD4E02B04.html>
- [34] WM8960 datasheet, [Електронний ресурс] URL:
http://lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2410121530_Cirrus-Logic-WM8960CGEFL-RV_C18752.pdf
- [35] AP3441SHE datasheet, [Електронний ресурс] URL:
https://lcsc.com/datasheet/lcsc_datasheet_2304140030_Diodes-Incorporated-AP3441SHE-7B_C2070918.pdf
- [36] SolidWorks, [Електронний ресурс] URL: <https://www.solidworks.com/>

[37] Mahmoud S. A., Ismail A. A., Elhoseny M. et al. Software defined radio: operation, challenges and possible solutions [Електронний ресурс] // International Journal of Communication Networks and Information Security. — 2016. — Т. 8, № 3. — Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/309777143>

[38] Khan S., Anjum M., Masood A. Receiving ADS-B Signals on Embedded Linux using RTL-SDR: A Practical Guide [Електронний ресурс] // Frontiers in Computer and Information Science. — 2022. — Т. 2, № 2. — Режим доступу: <https://drpress.org/ojs/index.php/fcis/article/view/14059>

[39] McFarlin D. Weak Signal Reception Using Software Defined Radios and a Two-Element Antenna Array [Електронний ресурс] : дис. ... M.Sc. — Auburn University, 2009. — Режим доступу: <https://holocron.lib.auburn.edu/handle/10415/613>

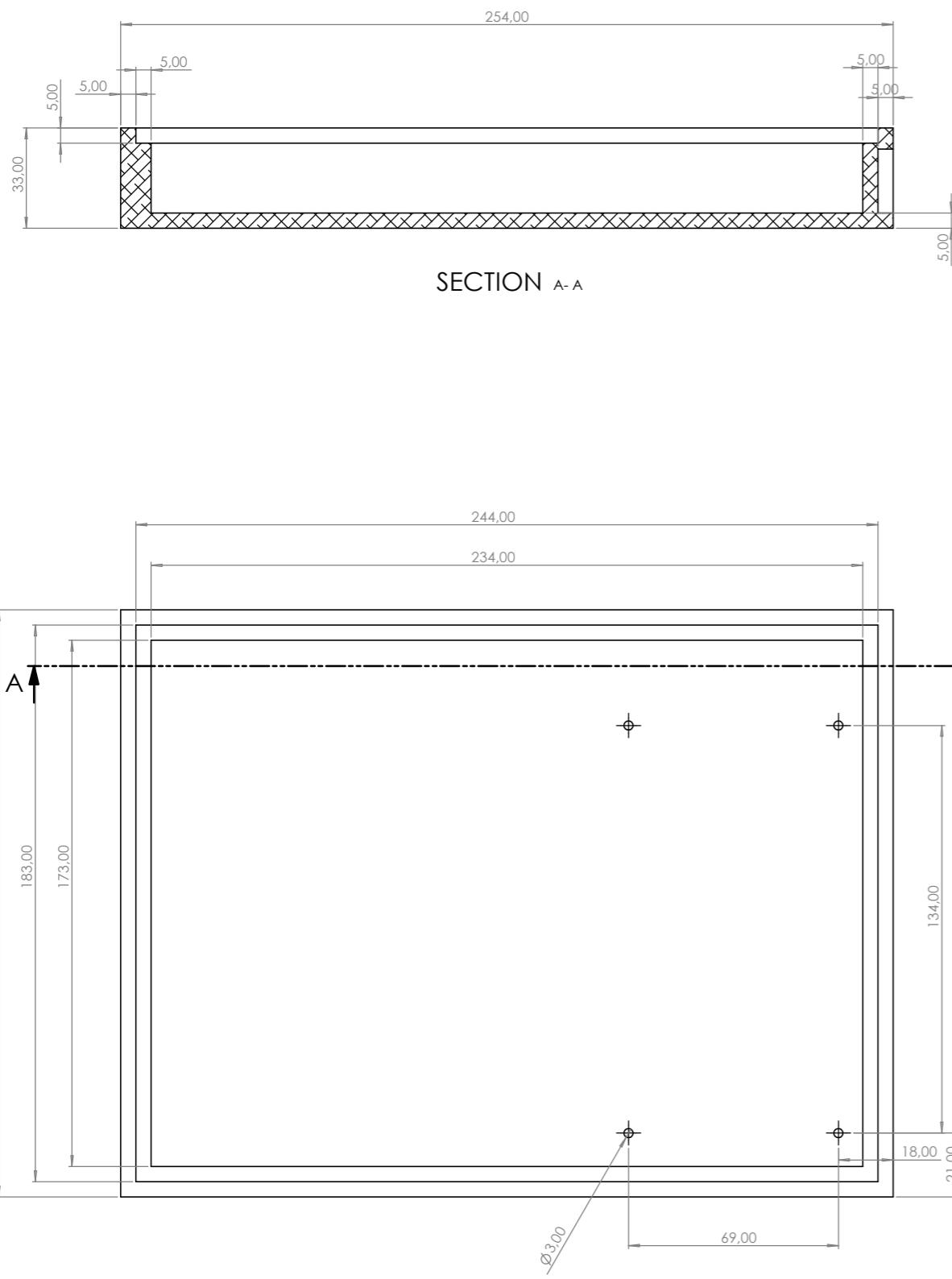
[40] Zhang Y., Zhao J., Zhang W. GPS Signal Reception and Spoofing Based on Software-Defined Radio Devices [Електронний ресурс] // ResearchGate. — 2023. — Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/367265928>

[41] Mihai C., Gontean A., Rusu C. Signals Intelligence System with Software-Defined Radio // Applied Sciences. — 2023. — Vol. 13, No. 8. — DOI: [<https://doi.org/10.3390/app13085199>]

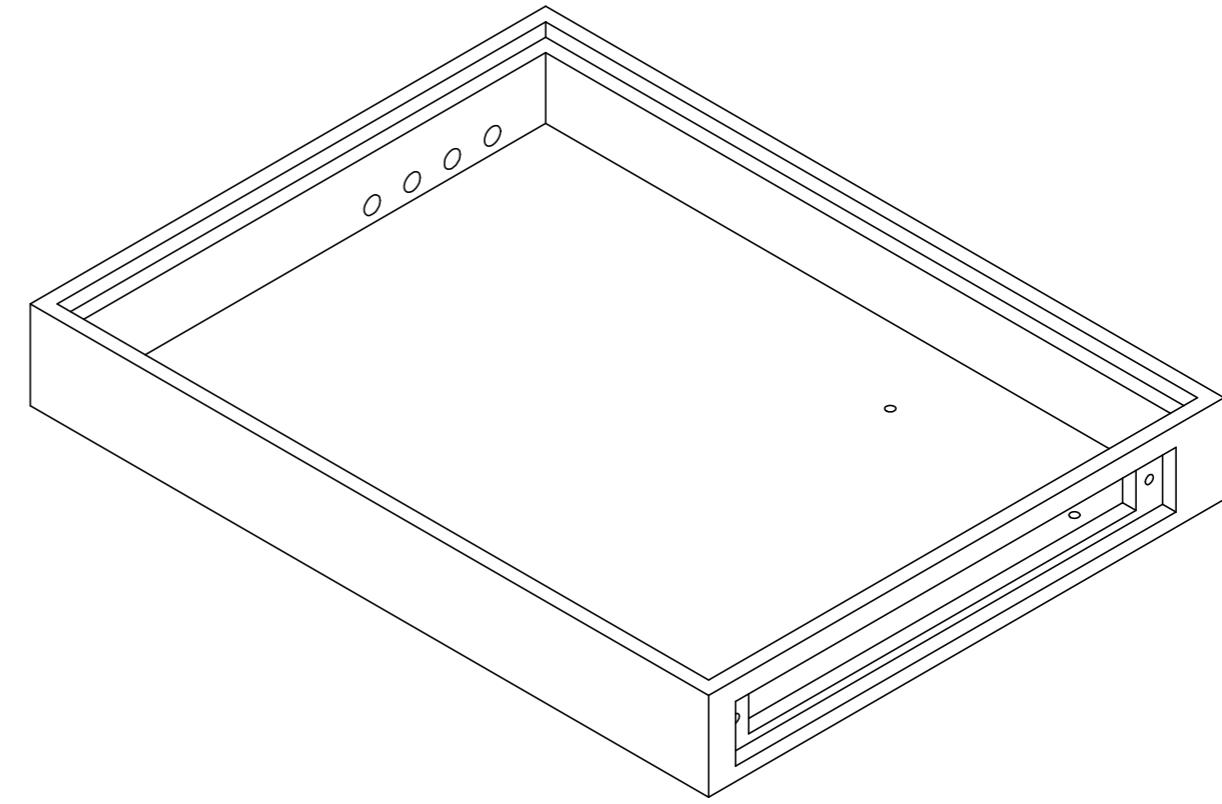
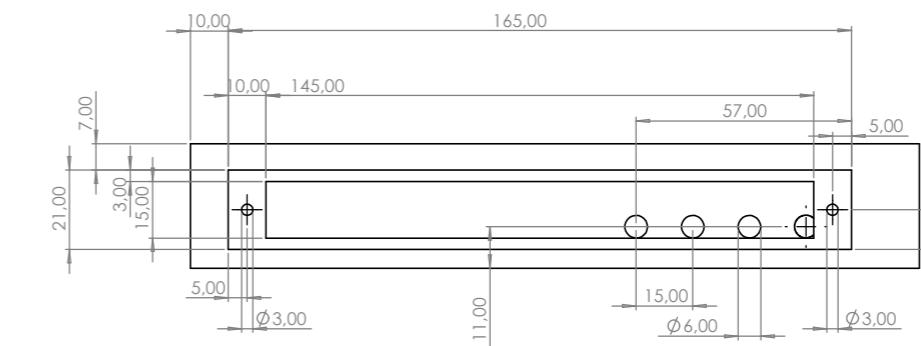
[42] Kumar R., Prasad M. Analysis of Wi-Fi Signal Transmission and Reception Using Software-Defined Radio [Електронний ресурс] // International Journal of Multidisciplinary Research. — 2022. — Режим доступу: <https://www.multiresearchjournal.com/admin/uploads/archives/archive-1743160648.pdf>

- [43] SDR#, [Електронний ресурс] URL: <https://airspy.com/download/>
- [44] GQRX, [Електронний ресурс] URL: <https://www.gqrx.dk/>
- [45] GNU Radio, [Електронний ресурс] URL: <https://www.gnuradio.org/>
- [46] Universal Radio Hacker, [Електронний ресурс] URL: <https://github.com/jopohl/urh>
- [47] Inspectrum, [Електронний ресурс] URL: <https://github.com/miek/inspectrum>
- [48] SDR++, [Електронний ресурс] URL: <https://github.com/AlexandreRouma/SDRPlusPlus>
- [49] SigDigger, [Електронний ресурс] URL: <https://batchdrake.github.io/SigDigger/>
- [50] Audacity, [Електронний ресурс] URL: <https://www.audacityteam.org/>
- [51] WebSDR, [Електронний ресурс] URL: <http://websdr.org/>
- [52] LRPTDecoder, [Електронний ресурс] URL: https://www rtl-sdr.com/m2_lrpt_decoder-version-59-released/
- [53] VB-Cable, [Електронний ресурс] URL: <https://vb-audio.com/Cable/>
- [54] NOAA 15, 18, 19, [Електронний ресурс] URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/NOAA-19>
- [55] Orbitron, [Електронний ресурс] URL: <https://www.stoff.pl/>

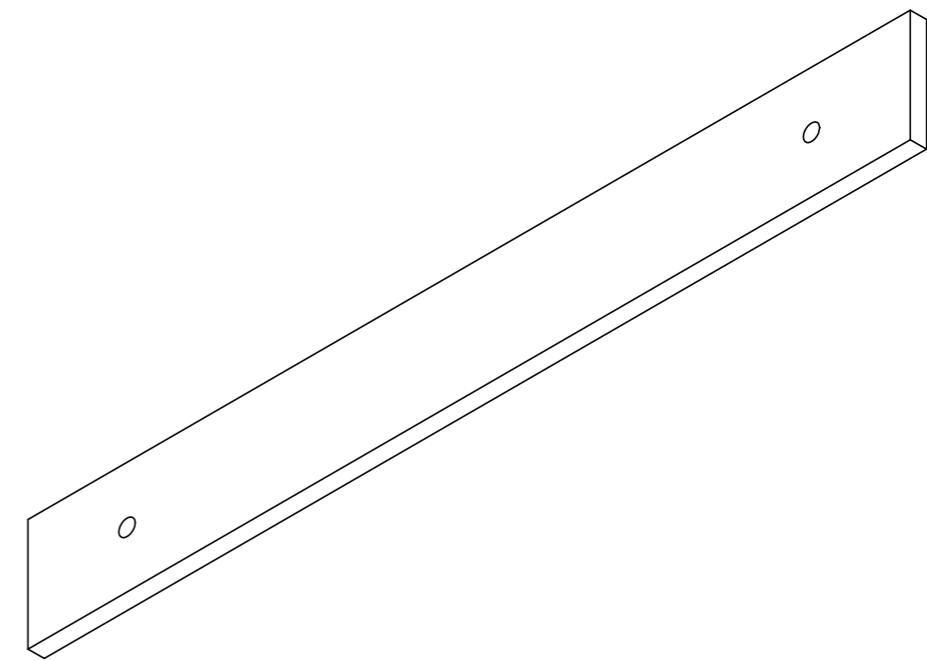
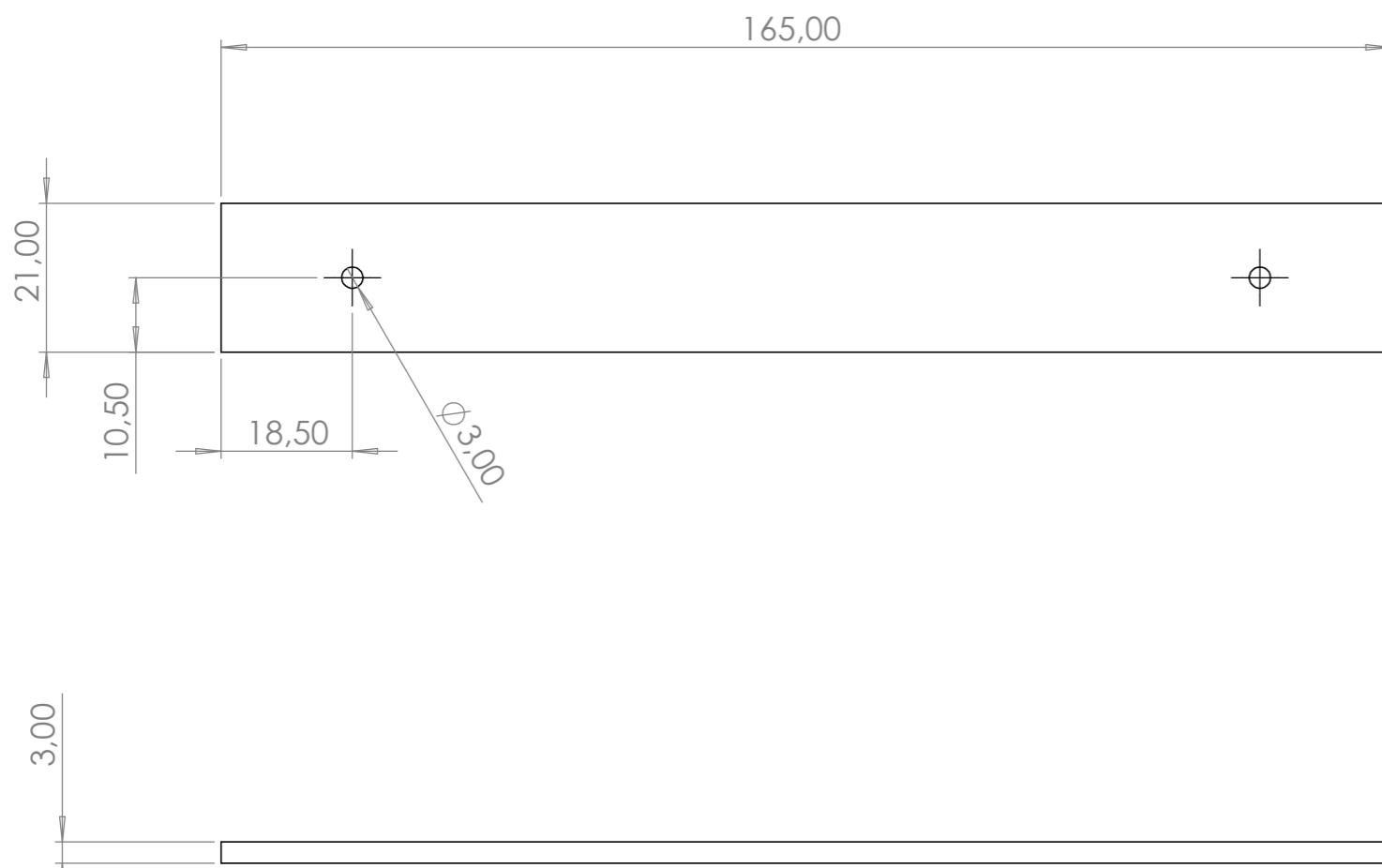
[56] Архів проєкту КПК, [Електронний ресурс] URL:
<https://github.com/Bogd-an/Diplom>



SECTION A-A



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		RHISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:					
DRAWN	SIGNATURE	DATE		TITLE:	
CHKD					
APP'D					
MFG					
QA	MATERIAL:		DWG NO.	A1	
4	3	WBGHT:	SCALE:1:1	Box SHEET 1 OF 1	
2	1				



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:	DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
CHK'D							
APP'D							
MFG							
Q.A					MATERIAL:	DWG NO.	
						SCALE:1:1	
						SHEET 1 OF 1	
Cover							
A3							

8 7 6 5 4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

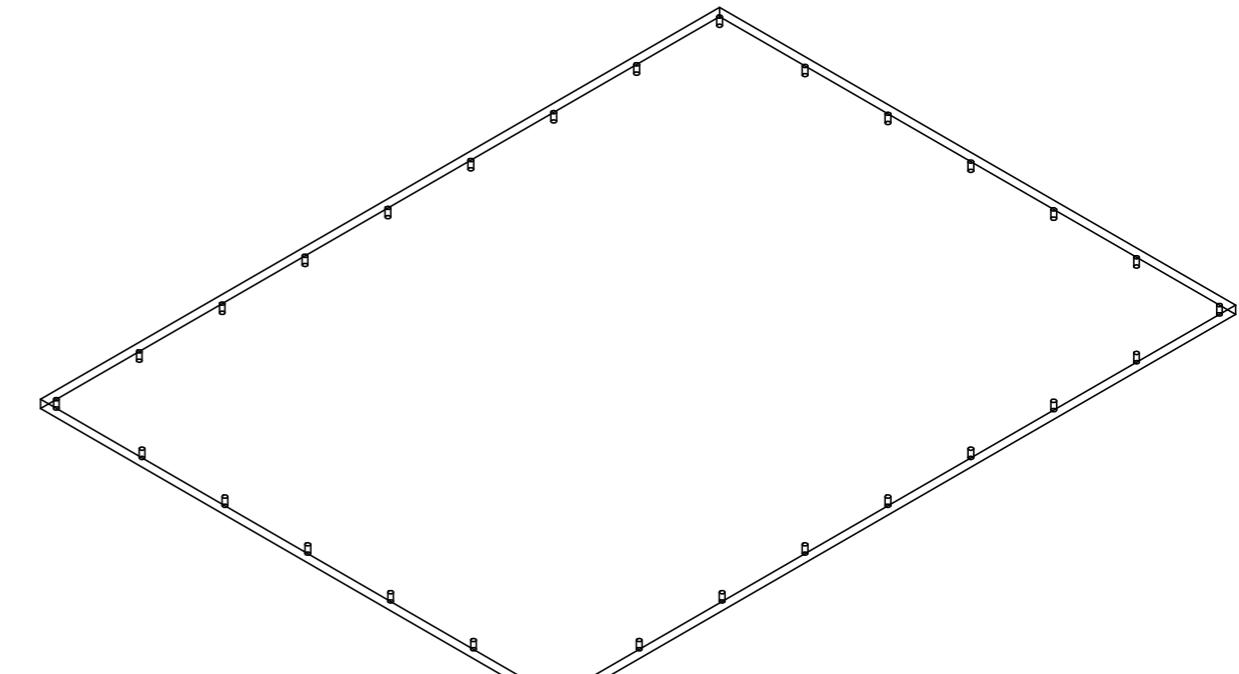
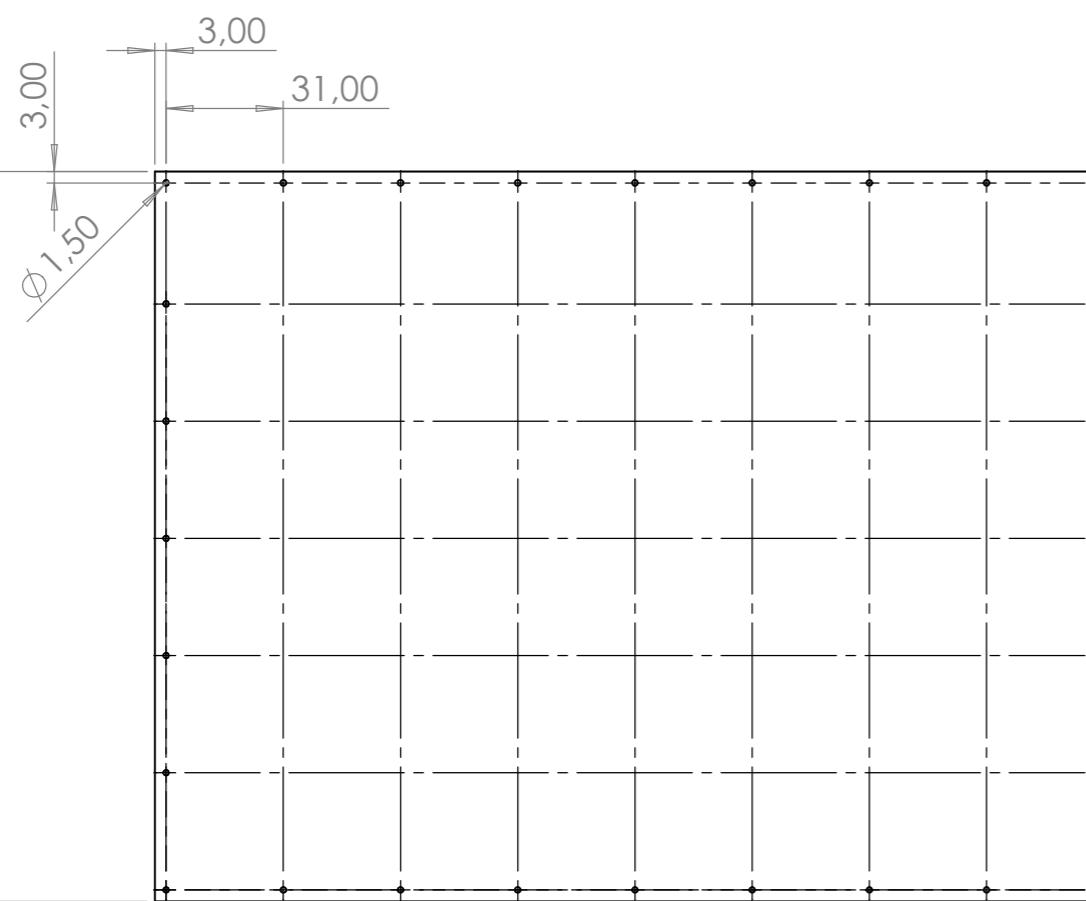
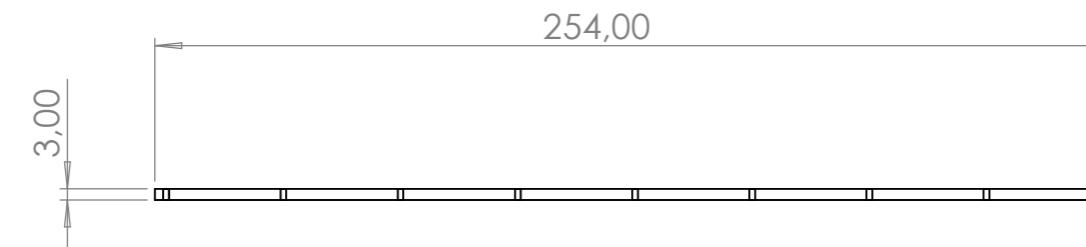
C

B

B

A

A



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

	NAME	SIGNATURE	DATE	
DRAWN				
CHK'D				
APP'D				
MFG				
Q.A				

MATERIAL:

WEIGHT:

FINISH:

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

TITLE:

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

DWG NO.

SCALE:1:2

Sheet 1 of 1

Top

A3

8

7

6

5

4

3

2

1

