

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

Кафедра радіотехніки та радіоелектронних систем

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК
рішенням кафедри радіотехніки та радіоелектронних систем
від року, протокол №.

Завідувач кафедри доктор фіз.-мат. наук, професор

_____ Ігор АНІСІМОВ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему:

**«ПРИСТРІЙ ПЕЛЕНГАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО
ВИПРОМІНЕННЯ В ДІАПАЗОНІ 2.4-2.48 ГГЦ»**

Виконав:

студент 4-го курсу

денної форми навчання

спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка

ОПП «Інформаційна безпека телекомунікаційних систем і мереж»

Грошев Михайло Олександрович _____

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, с.н.с.

Жиров Геннадій Борисович _____

Рецензент:

Старший науковий співробітник

Науково дослідного центру ВІКНУ

Мирослав Олександрович Коваль _____

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

Студент _____ Михайло Грошев

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
РОЗДІЛ 1.....	7
ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ.....	7
1.1 Сфери застосування 2.4 ГГц	7
1.1.1 Wi-Fi	7
1.1.2 Bluetooth	8
1.1.3 ZigBee	9
1.1.4 Відео пристрої.....	9
1.1.5 Безпілотні та дистанційно-керовані апарати.....	10
1.2 Пеленгація радіосигналу	11
1.2.1 Амплітудна пеленгація	12
1.2.2 Фазова пеленгація	12
1.2.3 Доплерівська пеленгація	13
1.3 Сфери застосування радіопеленгації	14
1.4 Існуючі засоби радіопеленгації та детектування	17
1.4.1 Комплекси РТР/РЕР	17
1.4.2 Портативні детектори БПЛА	18
1.4.3 Аналізатори спектру	19
РОЗДІЛ 2.....	20
РОЗРОБКА ПРОТОТИПУ ПЕЛЕНГАТОРА.....	20
2.1 Принцип дії пеленгатора	20
2.2 Структурна схема приладу	21
2.3 Вибір елементної бази	22
2.3.1 Мікроконтролер.	22
2.3.2 Антена	23

2.3.3 Індикатор.....	24
2.4 Розробка електричної схеми	25
2.5 Розробка корпусу	27
2.6 Створення програмного забезпечення	28
2.6.1 Код для відображення рівня сигналу (RSSI) Wi-Fi.....	28
2.6.2 Код для відображення рівня сигналу (RSSI) BLE.....	30
2.7 Тестування в експериментальних умовах	31
ВИСНОВКИ	33
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	34
ДОДАТОК А.....	38

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 40 с., 1 табл., 21 рис., 24 джерела

ПРИСТРІЙ ПЕЛЕНГАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЕННЯ В ДІАПАЗОНІ 2.4-2.48 ГГц.

Мета роботи – побудова пристрою пеленгації джерел електромагнітного випромінювання.

Наведено відомості про сфери застосування 2.4 ГГц, та стандарти зв'язку які займають цей діапазон.

Описано теоретичні аспекти пеленгування та їх практичні реалізації. А також існуючі технічні засоби пеленгації.

Було розроблено електричну принципову схему та електричну структурну схему на основі яких було розроблена друкована плата, корпус до неї та побудовано пеленгатор мереж Wi-Fi та пристроїв, що працюють за бездротовим протоколом зв'язку BLE, які якраз знаходяться в діапазоні частот вказаних в назві.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

BLE – енергозберігаюча версія Bluetooth, розроблена для пристроїв з низьким споживанням енергії

SSID – назва мережі вайфай

GSM – найпоширеніший у світі стандарт цифрового стільникового зв'язку другого покоління

Wi-Fi – технологія бездротового зв'язку

GNSS – загальний термін, що охоплює всі глобальні супутникові навігаційні системи.

PCB – друкована плата

IDE – інтегроване середовище розробки

ВСТУП

У наш час практично всі користуються бездротовими технологіями — Wi-Fi і Bluetooth є в кожному смартфоні, ноутбуці чи іншому пристрої. Але не завжди достатньо просто приймати сигнал — іноді потрібно знати, звідки саме він надходить. Це може стати в пригоді для пошуку джерела сигналу, орієнтації на місцевості, або ж просто для експериментів у радіоелектроніці.

У цій роботі я вирішив реалізувати простий пеленгатор, який буде визначати напрямок на джерело сигналу у діапазоні 2.4 ГГц (тобто Wi-Fi або Bluetooth). Працює він за амплітудним принципом — тобто орієнтується не на фазу чи час, а просто на силу сигналу, який приймається антеною. Чим сильніше сигнал — тим ближче антена до напрямку на джерело.

В основі пристрою лежить ESP32-S3, яка має вбудований Wi-Fi та Bluetooth і дозволяє зчитувати рівень сигналу (RSSI). Пристрій буде обертати (або вручну, або на поворотному механізмі) направлену антену Yagi, а показник рівня сигналу виводитиметься на OLED-дисплей. Arduino не використовується, бо весь функціонал можливо реалізувати на самій ESP32, що спрощує схему.

Загалом проект є спробою створити простий, доступний та робочий варіант пеленгатора, який зможе показувати напрямок на Wi-Fi або Bluetooth сигнал на основі лише сили його прийому. Його можна використовувати як для практичних цілей, так і для навчання або досліджень у сфері радіозв'язку.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ

1.1 Сфери застосування 2.4 ГГц

Смуга частот 2.4 ГГц широко застосовується у бездротових технологіях. Сфери застосування включають різноманітні галузі, починаючи від особистого використання, закінчуючи автоматизацією промислових процесів. Така популярність смуги зумовлена великою дальністю розповсюдження такого сигналу та здатності підключатись практично до усіх пристроїв. Велика кількість протоколів бездротового зв'язку працюють на вищезазначеній смузі.

До приладів, що застосовують смугу 2.4 ГГц належать Wi-Fi роутери (стандарт IEEE 802.11b/g/n), Bluetooth-модулі, бездротові миші та клавіатури, бездротові навушники, камери спостереження, розумні годинники та інші пристрої, що побудовані у межах концепції інтернету речей.

У промисловості діапазон 2.4 ГГц використовується для автоматизації процесів, систем моніторингу та керування, а також у телеметрії. Часто його використовують у дистанційно керованих системах, дронах, медичних пристроях для передавання даних, а також у бездротових сенсорних мережах. Незважаючи на популярність, головним недоліком цього діапазону є висока зашумленість і потенційні перешкоди, оскільки багато пристроїв одночасно працюють в ньому. Через це в деяких випадках перевагу надають менш завантаженим частотним діапазонам, наприклад 5 ГГц або 868 МГц.

1.1.1 Wi-Fi

Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) розробив серію стандартів 802.11, що регламентують роботу бездротових локальних мереж (WLAN) [1], які в побуті відомі під назвою Wi-Fi. Одним із базових частотних діапазонів для цих стандартів є смуга 2.4 ГГц, що використовувалась ще у початкових версіях протоколу. Саме цей діапазон забезпечив популярність Wi-Fi через доступність і здатність передавати сигнал на відносно великі відстані з хорошою проникністю крізь перешкоди. Проте в процесі розвитку технології було

впроваджено багато модифікацій, які дозволили покращити швидкість, надійність та енергоефективність бездротового з'єднання.

Незважаючи на широке розповсюдження діапазону 2.4 ГГц, однією з проблем є його високий рівень зашумленості через велику кількість пристроїв, що працюють у цій смузі [2]. Це особливо важливо враховувати при проектуванні пристроїв з автономним живленням, адже класичні Wi-Fi-мережі мають порівняно високе енергоспоживання. Сучасні стандарти, як-от 802.11ax, покращують енергоефективність і продуктивність, зокрема й у 2.4 ГГц. Крім того, для пристроїв Інтернету речей створено спеціальний стандарт 802.11ah, який працює на нижчих частотах і має збільшену дальність дії при низькому енергоспоживанні.

1.1.2 Bluetooth

Bluetooth — це технологія бездротового зв'язку малого радіусу дії, яка дозволяє обмінюватися даними між пристроями на коротких відстанях без потреби у кабелях. Вона працює переважно в радіочастотному діапазоні 2.4 ГГц, використовуючи метод частотної перестройки (FHSS — Frequency Hopping Spread Spectrum), що забезпечує надійність з'єднання навіть у зашумленому середовищі. Основним призначенням Bluetooth є створення персональних мереж (PAN) для передачі аудіо, файлів, керування пристроями та підключення периферії — наприклад, навушників, мишей, клавіатур чи смартфонів [3].

Протягом розвитку технології з'явилося декілька версій Bluetooth, кожна з яких удосконалювала швидкість, стабільність та енергоефективність. Наприклад, Bluetooth 4.0 та вище включають режим Low Energy (BLE), який дозволяє використовувати бездротове з'єднання в пристроях із живленням від батарей — таких як фітнес-браслети, датчики температури, маячки (beacons) та інші компоненти Інтернету речей (IoT). Це зробило технологію надзвичайно популярною в мобільних і носимих пристроях.

Bluetooth має обмежену дальність дії, яка залежить від класу передавача: від кількох метрів (клас 3) до 100 метрів (клас 1) у відкритому просторі. Швидкість передавання даних також варіюється: від кількох сотень кбіт/с у BLE до 3 Мбіт/с у класичному Bluetooth 2.0 + EDR. Останні версії, як Bluetooth 5.0 і вище, дозволяють

збільшити дальність і стабільність з'єднання, що розширює сферу застосування технології в розумних будинках, промисловості та медичній сфері [4].

1.1.3 ZigBee

ZigBee — це бездротовий стандарт зв'язку, спеціально розроблений для створення енергоефективних мереж з низькою швидкістю передавання даних. Він працює в ліцензійно вільних частотних діапазонах, зокрема 2.4 ГГц (глобально), 868 МГц (Європа) та 915 МГц (Північна Америка). ZigBee базується на стандарті IEEE 802.15.4 і підтримує побудову сітчастих (mesh) мереж, де пристрої можуть передавати дані один через одного, що підвищує надійність та зону покриття мережі [5].

Технологія широко застосовується в системах автоматизації будівель, розумних будинках, промисловій автоматизації та рішеннях для Інтернету речей (IoT). Пристрої на базі ZigBee зазвичай споживають дуже мало енергії, тому можуть працювати роками на одній батарейці. Завдяки цьому ZigBee є ідеальним вибором для підключення великої кількості сенсорів, датчиків, вимикачів, ламп і контролерів, які не потребують великої пропускну здатності.

Ще однією перевагою ZigBee є його гнучкість у масштабуванні: мережа може містити до тисячі вузлів, що робить її придатною для великих розподілених систем. Хоча швидкість передавання даних у ZigBee невисока (до 250 кбіт/с у діапазоні 2.4 ГГц), цього достатньо для більшості задач — як-от передача сигналів від датчиків чи команд керування. Завдяки відкритим специфікаціям та підтримці альянсу ZigBee Alliance (нині частина CSA), технологія має широку підтримку серед виробників і стала основою багатьох комерційних рішень.

1.1.4 Відео пристрої

Відеопередавачі зазвичай працюють із використанням частотної модуляції (FM), передаючи відеосигнал з однієї кімнати в іншу, наприклад, для супутникового телебачення або систем відеоспостереження (CCTV). Такі пристрої зазвичай працюють безперервно, але мають низьку потужність передавання — приблизно 10 мВт. Проте деякі пристрої, особливо бездротові камери, можуть працювати на значно вищих (іноді — несанкціонованих) рівнях потужності та

використовувати антени з високим коефіцієнтом підсилення, що може спричиняти радіочастотні завади для інших користувачів спектра.

Оператори аматорського радіозв'язку мають змогу передавати двостороннє аматорське телебачення та голосовий зв'язок у діапазоні 2.4 ГГц — а також на всіх ISM-частотах вище 902 МГц. У США максимальна дозволена потужність передавання становить до 1500 ват, за умови, що використовується режим без застосування технологій із розширеним спектром (spread spectrum)[6]. В інших країнах ці обмеження різняться залежно від регіонального законодавства. Наприклад, у Великій Британії максимальна дозволена потужність для повної ліцензії складає 400 ват.

Передавачі деяких відеокамер, які на перший погляд працюють на фіксованій частоті, насправді є частотно адаптивними. У ряді моделей було виявлено можливість зміни частоти роботи шляхом розбирання пристрою та перемикання внутрішніх перемичок або DIP-перемикачів на платі. Це відкриває додаткові можливості для конфігурації, але також ускладнює регулювання і контроль використання радіочастотного спектра [3].

Через аналогову природу відеосигналу, подібні пристрої особливо вразливі до радіочастотних завад з боку інших пристроїв, що працюють у діапазоні 2.4 ГГц [7]. Щоб забезпечити чисте зображення без спотворень, потрібне співвідношення сигнал/шум на рівні приблизно 20 дБ. Безперервні передачі інших пристроїв можуть викликати характерні спотворення, такі як мережеві візерунки на екрані, зміна яскравості або повне блокування зображення. Неперервні джерела, наприклад Wi-Fi, можуть спричиняти горизонтальні шумові смуги або завадні звуки у вигляді клацань і тріску в аудіосигналі.

1.1.5 Безпілотні та дистанційно-керовані апарати

Діапазон 2.4 ГГц є одним із найпоширеніших для керування дронами, особливо у споживчому та напівпрофесійному сегменті. Більшість радіокерованих квадрокоптерів використовують саме цю частоту для передачі команд між пультом керування та самим дроном. Причина популярності — це відносно велика дальність зв'язку (до кількох сотень метрів у прямій видимості), хороша

проникність сигналу та сумісність із компактними антенами. Така частота забезпечує стабільний контроль навіть у складних умовах — наприклад, у лісах або міській забудові. Велику популярність здобуло використання данної смуги частот у так званих FPV дронах [8]

Окрім керування, 2.4 ГГц також використовується для передачі телеметрії, тобто даних про швидкість, висоту, положення, заряд акумулятора та інші параметри польоту [9]. У деяких моделях дронів 2.4 ГГц застосовується як частина протоколу зв'язку з GPS-модулями або зовнішніми модулями наземної станції. Деякі сучасні системи автоматичного керування та польотні контролери використовують цей діапазон для синхронізації між компонентами, а також для побудови mesh-мереж між кількома апаратами.

Проте використання 2.4 ГГц має вагомий недолік, а саме можливість появи завад через велику кількість приладів з подібними роочими частотами. Тому професійні дрони іноді використовують інші частоти — наприклад, 5.8 ГГц для відеопередачі або спеціалізовані канали зв'язку на 433 МГц чи 900 МГц для керування. Тим не менш, 2.4 ГГц залишається найпоширенішим вибором завдяки доступності, простоті реалізації та широкій підтримці з боку виробників.

1.2 Пеленгація радіосигналу

Радіопеленгація — це процес визначення напрямку на джерело радіосигналу за допомогою спеціалізованих антен і приймачів. Суть методу полягає у виявленні кута, під яким радіосигнал надходить до приймальної станції. Зазвичай для цього використовуються спрямовані, які дозволяють визначити азимут на джерело випромінювання. Радіопеленгація може здійснюватись як вручну, так і автоматизовано, з використанням обчислювальної техніки для точнішої обробки сигналів [10].

Одна з основних сфер застосування радіопеленгації — військова та розвідувальна діяльність, де вона використовується для виявлення та класифікації джерел радіопередач супротивника. Також пеленгація є важливим інструментом у цивільній авіації та мореплавстві для навігації, пошуку аварійних радіомаяків і забезпечення безпеки польотів. Крім того, системи радіопеленгації застосовуються

в моніторингу та управлінні частотним спектром для виявлення несанкціонованих або завадних передавачів.

Сучасні системи радіопеленгації використовують цифрову обробку сигналів і можуть включати кілька приймальних пунктів, що дозволяє здійснювати тривимірну локалізацію джерела за методом тріангуляції.

1.2.1 Амплітудна пеленгація

Амплітудна пеленгація ґрунтується на аналізі залежності амплітуди сигналу від кута повороту спрямованої антени (або антенної системи). Коли діаграма спрямованості антени співпадає з напрямком на джерело, рівень прийнятого сигналу досягає максимуму. Цей метод, відомий як «метод максимуму», є найпростішим для реалізації і часто застосовується в класичних РЛС [11].

Окрім максимуму, існують також методи «мінімуму» та «порівняння амплітуд». У методі мінімуму антену повертають до такого кута, де амплітуда сигналу досягає мінімального значення, що забезпечує високу чутливість, але знижує дальність через поганий сигнал/шум. Метод порівняння використовує дві (або більше) канали/випромінювачі з перекресленими діаграмами спрямованості: пеленг визначається моментом, коли амплітуди сигналів однакові. Цей спосіб забезпечує високу точність й автоматизацію [12].

Амплітудна пеленгація має низку переваг: легко реалізується технічно (особливо метод максимуму) і не потребує складної синхронізації. Методи порівняння забезпечують високу точність за хороших умов сигнал/шум. Однак вони чутливі до флуктуацій амплітуди, шуму та відбитих сигналів, а також вимагають вузькоспрямованих антен з чіткими діаграмами спрямованості [10].

1.2.2 Фазова пеленгація

Фазовий метод радіопеленгації ґрунтується на вимірюванні різниці фаз сигналів, що надходять до просторово рознесених антен. Оскільки хвиля досягає антен у різний час, виникає фазова різниця, яка залежить від кута приходу сигналу. Знаючи відстань між антенами та довжину хвилі, можна точно обчислити напрямок на джерело випромінювання. Для цього використовують спеціальні фазові

комутатори або антенні решітки, які дають змогу автоматизовано та з високою точністю визначати пеленг [10].

Основною перевагою фазового методу є висока точність вимірювання напрямку, що дозволяє використовувати його в складних радіоелектронних системах, зокрема — в авіаційній, морській та військовій техніці. Завдяки можливості миттєвої обробки сигналів та відсутності потреби у механічному повороті антени, фазові системи пеленгації здатні працювати в реальному часі та відстежувати джерела, що рухаються. Такі системи часто застосовуються в комплексах радіоелектронної розвідки та автоматизованого моніторингу спектру.

Проте фазовий метод має і певні недоліки. Його реалізація потребує високої точності вимірювання фазових різниць, що особливо складно при наявності шумів або багатопроменевого поширення сигналу. Крім того, можливі фазові неоднозначності, коли кілька напрямків дають однакову різницю фаз — це обмеження зазвичай вирішується використанням декількох пар антен або більш складних алгоритмів обробки сигналів. Незважаючи на це, фазовий метод залишається одним із найефективніших засобів радіопеленгації у високоточних системах.

1.2.3 Доплерівська пеленгація

Доплерівський метод радіопеленгації базується на використанні ефекту Доплера, який виникає при відносному русі між антеною пеленгатора та джерелом радіосигналу. Під час приймання радіохвиль, що надходять до рухомої антени, спостерігається зсув частоти сигналу, залежно від напрямку цього руху. Вимірюючи величину доплерівського зсуву, можна визначити напрямок на джерело сигналу. Максимальне зміщення частоти спостерігається тоді, коли антена рухається строго в напрямку прибуття радіохвилі.

Щоб забезпечити необхідний відносний рух, у класичних доплерівських системах антена повинна переміщуватися в приймальному полі з достатньою швидкістю. Проте обертання однієї антени є технічно складним завданням, тому на практиці використовують квазідоплерівські пеленгатори. Вони складаються з кількох антен, розташованих по колу. За допомогою швидкого електронного

перемикання сигналу між антенами створюється ефект, еквівалентний механічному обертанню, що дозволяє імітувати рух без фізичного переміщення [10].

Доплерівські системи пеленгації мають ряд переваг: вони дозволяють використовувати антени з великою базою, забезпечують високу точність і чутливість, не мають похибок, пов'язаних з розносом антен, і можуть навіть визначати кут місця сигналу. Крім того, такі системи мають добру стійкість до викривлень хвильового фронту. Проте їхнім недоліком є чутливість до перешкод, особливо при модуляції FM та у випадку завад в окремих каналах, що може призвести до помилок у визначенні напрямку. Також такі системи є технічно складними й дорогими, оскільки потребують ретельного налаштування та доопрацювання.

1.3 Сфери застосування радіопеленгації

Радіопеленгація має широке застосування в різних галузях, оскільки дозволяє визначати напрямок на джерело радіосигналу. Однією з найважливіших сфер використання є військова справа. Тут радіопеленгатори застосовуються для виявлення, класифікації та супроводу джерел радіовипромінювання противника. Це дає змогу не лише відстежувати активність ворожих засобів зв'язку, але й проводити навігацію, цілевказання, а також здійснювати радіоелектронну боротьбу — глушіння, дезорієнтацію або подавлення ворожих систем. На рис. 1 показано вітчизняну систему РЕР «Кольчуга» [13].

У авіації та морській навігації радіопеленгація використовується для визначення місцезнаходження повітряних суден, кораблів і маяків. За допомогою наземних або корабельних пеленгаторів можна визначити курс літака або судна відносно берегових станцій, навіть у випадках поганої видимості чи відсутності супутникового сигналу. Це особливо актуально в умовах арктичної, океанської чи пустельної навігації, де використання GPS або ГЛОНАСС ускладнене або недоступне.



Рисунок 1.1 Система РЕР «Кольчуга»

Пошуково-рятувальні операції активно використовують радіопеленгацію для виявлення аварійних радіомаяків (ELT, EPIRB), які активуються у разі катастроф. Пеленгатори можуть бути встановлені на вертольотах, літаках або наземних транспортних засобах рятувальних служб. Це дозволяє оперативно визначати місце перебування постраждалих, навіть у складних географічних умовах або при відсутності прямих візуальних орієнтирів. На рисунку 1.2 показано аварійний радіомаяк Artex ME406 [14]



Рисунок 2.2 Аварійний радіомаяк Artex ME406

У цивільному секторі зв'язку радіопеленгація застосовується для моніторингу радіочастотного спектру, виявлення нелегальних передавачів, джерел завад та інших порушень у роботі радіосистем. Регуляторні органи, такі як НКЕК в Україні або FCC у США, використовують пеленгатори для контролю дотримання частотного плану та забезпечення електромагнітної сумісності між різними системами зв'язку. На рисунку 1.3 показано працівників радіочастотного моніторингу УДЦР [15]

Значну роль радіопеленгація відіграє і в наукових дослідженнях, зокрема в атмосферних, геофізичних і астрономічних спостереженнях. Наприклад, пеленгування джерел радіовипромінювання в космосі дозволяє визначати координати пульсарів, аналізувати активність Сонця або спостерігати за явищами у верхніх шарах атмосфери, такими як блискавки або грозові фронти.



Рисунок 3.3 Фахівець УДЦР проводить радіопеленгацію джерела радіозавад

Також важливим напрямком є використання радіопеленгації в техніці безпеки та правоохоронній діяльності. За допомогою пеленгаторів можна виявляти та відстежувати мобільні телефони, радіостанції злочинців або терористів, визначати місця ведення незаконної діяльності, пов'язаної з радіозасобами. У

деяких випадках пеленгатори застосовуються в спецопераціях для точного наведення на ціль або контроль ситуації в реальному часі.

Можна зазначити що різноманіття сфер застосування радіопеленгації зумовлює широкий спектр відповідних технічних засобів.

1.4 Існуючі засоби радіопеленгації та детектування

1.4.1 Комплекси РТР/РЕР

На ринку спеціалізованих радіотехнічних засобів та обладнання для радіомоніторингу та пеленгації присутні такі системи, як «ПЛУТОН», «ХОРТИЦЯ-М», «АРЕЛЛА» та «PLASTUN-RP3000» від «Інфозахист». Вони охоплюють широкий діапазон радіочастот — від 25 МГц до кількох ГГц, мають чутливість до -120 дБм і технічну похибку пеленгу менше $0,5^\circ$. Зазвичай це переносні комплекси вагою до ~ 40 кг (як у PLASTUN-RP3000), що дозволяє використовувати їх як у польових, так і в стаціонарних умовах для моніторингу ефіру та виявлення джерел випромінювання. Система PLASTUN-RP3000 в свою чергу дозволяє пеленгувати системи навіть з ППРЧ, може інтегруватись в системи ситуаційної обізнаності для створення актуальної мапи радіоелектронної обстановки. На рисунку 1.4 наведено систему PLASTUN-RP3000 [16]



Рисунок 4.4 Система РЕР PLASTUN-RP3000

Дані системи призначені для ведення радіорозвідки, пеленгації випромінювачів радіочастот на певних частотах, визначення їх координат. Прикладом є станція «Пластун», що вміє пеленгувати ворожі РЛС, РЕБ-модулі, артилерію, кораблі — навіть у режимі реального часу. Вона вже активно використовується ЗСУ, дозволяючи визначати ворожі радіовипромінюючі об'єкти. Дані системи також дозволяють пеленгувати випромінювання на частоті 2.4 ГГц через його поширене використання у військовій справі.

1.4.2 Портативні детектори БПЛА

Фактично, такі портативні детектори являють собою детектор радіосигналу певних, найбільш розповсюджених частот, а саме діапазону 0.9 – 6 ГГц. Портативні аналізатори, а саме DDSR1 V3 та MDDSR1 "Ксеон-L" оснащені штирьовими антенами, які через свою діаграму напрямленості здатні виконувати лише функцію детектування радіосигналу, без вказання його пеленгу. Вони автономні (до 16 годин), мають дальність реакції від 1,5 км, прості в експлуатації, сповіщають звук/вібрацією/світловим сигналом, оснащені IP-захистом. До переваг даного приладу належать його низька ціна, достатні для виконання завдань характеристики [17]. На рисунку 1.5 наведено детектор дронів MDDSR1 "Ксеон-L" [17].



Рисунок 5.5 детектор дронів MDDSR1 "Ксеон-L"

1.4.3 Аналізатори спектру

Найбільш поширеним аналізатором спектру є TinySA Ultra. спектроаналізатори, які охоплюють від десятків Гц до 6 ГГц. Вони можуть виявляти не лише дрони, але й інші RF-пристрої: GSM, Wi-Fi, FPV-відео, GNSS тощо. TinySA Ultra має дальність дії до 5 км і сенсорний дисплей 4", проте автономність становить лише 2–4 год. Дані вироби зазвичай можуть оснащуватись необхідною антеною. В більшості на них встановлюється направлена антена, котра дозволяє визначати місце положення джерела сигналу. Сьогодні такі спектроаналізатори дозволяють достатньо дешево отримати інструмент спроможний виконувати базові задачі радіо електронної розвідки, пеленгації сигналів. Варто відзначити наявність користувацького програмного забезпечення під необхідний функціонал приладу. На рисунку 1.6 наведено спектроаналізатор TinySA Ultra з встановленою направленою антеною та захисним корпусом [18].



Рисунок 6.6 спектроаналізатор TinySA Ultra

Спільним недоліком наведених вище систем є висока ціна. Отже завдання створення доступного пеленгатора 2.4 ГГц смуги є актуальним.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ПРОТОТИПУ ПЕЛЕНГАТОРА

Перед розробкою необхідно визначити принципи роботи майбутнього приладу.

2.1 Принцип дії пеленгатора

Пеленгатор визначає напрямок надходження радіосигналу. Це досягається шляхом вимірювання фазової або амплітудної різниці сигналу, прийнятого кількома антенами, або за допомогою направленої антени, що має максимальну чутливість у певному напрямку. Аналізуючи ці дані, пеленгатор розраховує кут розташування джерела сигналу.

Важливо зазначити, що в даному випадку ми зосереджуємося виключно на визначенні напрямку, з якого надходить сигнал, без обчислення конкретного азимуту. Тобто, ми встановлюємо лінію, вздовж якої розташоване джерело, але не його точне географічне положення відносно півночі. Для вимірювання рівня сигналу ми будемо використовувати показник RSSI. RSSI (Received Signal Strength Indication) — це показник потужності бездротового радіосигналу, який приймає пристрій. Зазвичай він вимірюється в децибелах на міліват (дБм) і відображає силу сигналу, що надходить до приймача. Чим вище значення RSSI (тобто ближче до нуля, наприклад, -50 дБм краще, ніж -90 дБм), тим сильніший сигнал. Високий показник RSSI свідчить про кращу якість зв'язку, меншу кількість втрат пакетів даних та вищу швидкість передачі.

Для забезпечення функцій пеленгації використовуємо направлену антену, а саме антену Yagi. Антени Ягі відносяться до поздовжніх випромінювачів і мають у своєму складі елементи, які збуджуються випроміненням. Цей тип антен отримав свою назву за ім'ям одного з його винахідників, японського професора Ягі. Іноді використовується найменування «антени Ягі-Уда», а в україномовних джерелах такі антени іноді називають антенами типу «хвильовий канал». Ця конструкція антен була спеціально розроблена для діапазону радіохвиль від високих частот (ВЧ, HF) до верхньої частини діапазону дуже високих частот (ДВЧ, UHF). Антени Ягі дуже популярні з причини простоти конструкції та відносно високого коефіцієнту

підсилювання. Як правило, їх відносять до високонправлених антен. Окрім радіо, антени цього типу застосовуються й у радіолокації.

В антенах Ягі використовується взаємодія між елементами, в яких виникають стоячі хвилі струму, в результаті чого виникає біжуча хвиля з вираженою діаграмою направленості. Така антена складається з одного або кількох активних вібраторів (диполів) і додаткових пасивних елементів. Елементи антени Ягі зазвичай приварюються до провідного стрижня або трубки, що називають стрілою. Точка з'єднання відповідає середині елемента. Така конструкція має на меті лише забезпечення механічної міцності антени і не впливає на її робочі характеристики. Оскільки активний елемент має центральне живлення, він не приварюється до опорного стрижня. Вхідний імпеданс антени може бути збільшений шляхом використання петльового вібратора у якості активного елемента [19]. На рисунку 2.1 показані складові елементи антени Ягі [19].



Рисунок 2.1 складові елементи антени Ягі

Для обробки інформації отриманою антеною буде використано мікроконтролер. Крім обробки даних, мікроконтролер буде використано для контролю відповідних індикаторів. Ці індикатори мають на меті подати необхідну оброблену інформацію у зручному для користувача вигляді.

2.2 Структурна схема приладу

Виходячи з вимог до приладу було створено структурну схему майбутнього приладу, яка складається з антени, мікроконтролера, екрана для відображення інформації. Дана схема наведена на рисунку 2.2

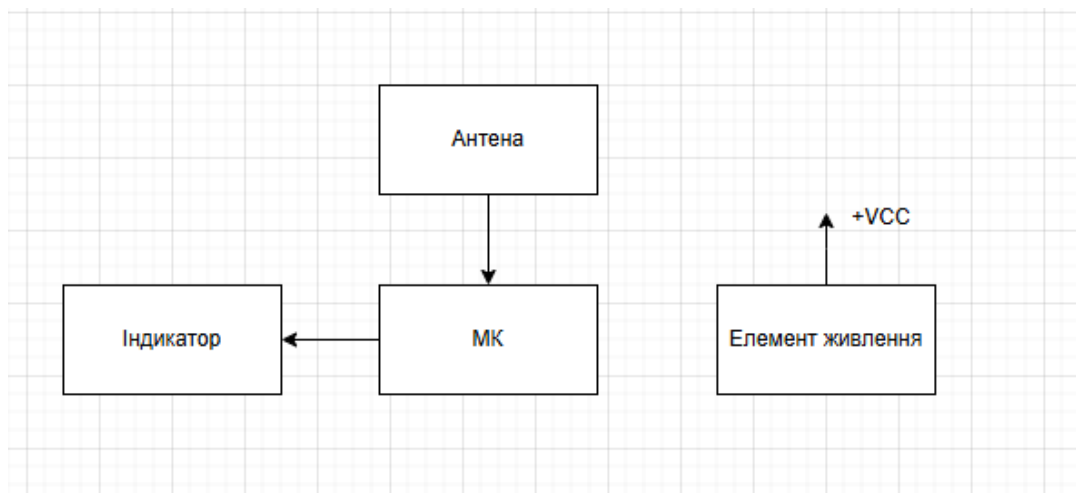


Рисунок 2.2 Структурна схема пеленгатора

Дана схема забезпечує виконання функції пеленгування при доступній ціні приладу.

2.3 Вибір елементної бази

На основі структурної схеми проведемо вибір елементної бази.

2.3.1 Мікроконтролер.

Беручи до уваги необхідні характеристики було обрано мікроконтролер ESP32S3 WROOM-1. ESP32S3 WROOM-1 — це високопродуктивний SoC (System-on-Chip) модуль від Espressif, який об'єднує у собі двоядерний Tensilica Xtensa LX7, модулі Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 5 (BLE), внутрішню пам'ять та RF-блок для підключення зовнішньої антени. В таблиці 2.1 наведено основні характеристики даного мікроконтролера [20].

Таблиця 2.1 Характеристики ESP32S3 WROOM-1

Характеристика	Значення
Процесор	ESP32-S3
Робоча частота	240 МГц
Пам'ять	Flash до 16 МБ; PSRAM до 8 МБ
Бездротові технології	Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 ГГц); Bluetooth 5.0 LE

Інтерфейси	GPIO (до 36), SPI, I ² C, UART, I ² S, PWM, ADC, TWAI/CAN, USB OTG
Живлення	3.0–3.6 В

Потужності даної плати має вистачити для поставлених задач. Зовнішній вигляд плати наведено на рисунку 2.3 [21].



Рисунок 2.3 ESP32-S3-WROOM-1

2.3.2 Антена

Використано напрямлену антену Ягі, на 2.4 ГГц. Конкретно ця антена забезпечує прийом радіочастот у смузі 2.35–2.55 ГГц, що ідеально підходить для детектування Wi-Fi та BLE. На антені присутні роз'єм SMA, який забезпечує

передачу сигнала з низьким рівнем шуму. На рисунку 2.4 наведено антену Ягі для 2.4 ГГц [22].

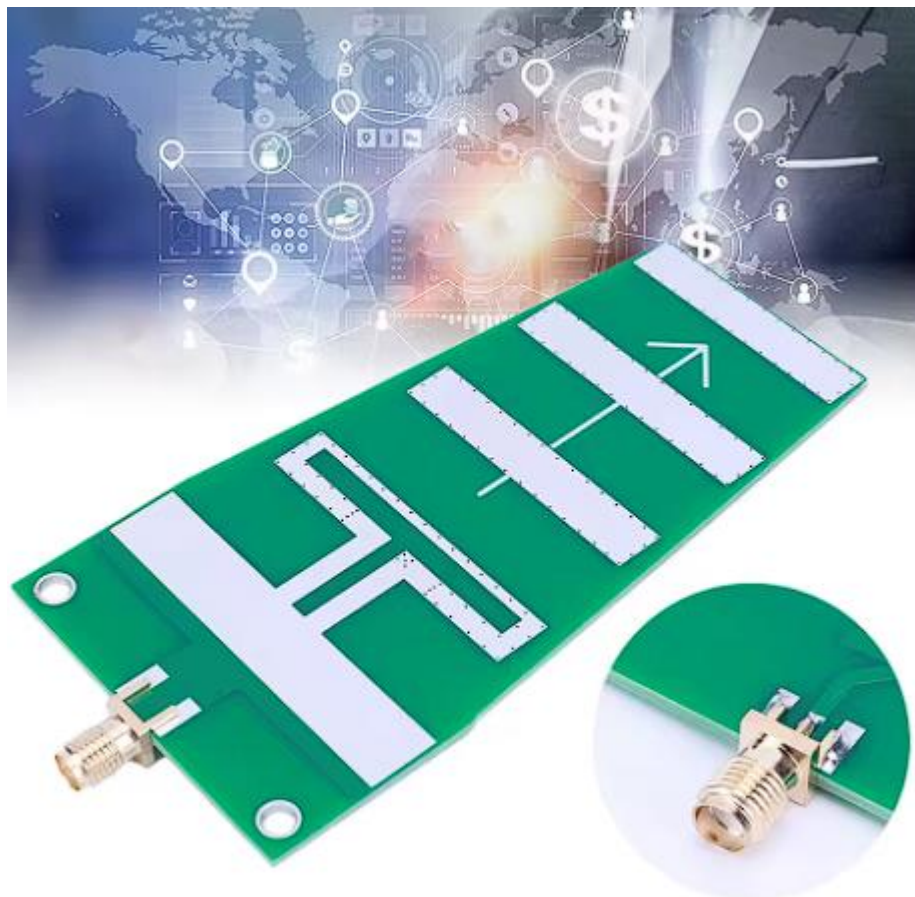


Рисунок 2.4 Направлена антена Ягі для 2.4 ГГц

2.3.3 Індикатор

Беручи до уваги необхідність виведення великої кількості інформації у зрозумілому користувачу виді було прийнято рішення використати екран, а саме OLED дисплей SSD1315, показаний на рисунку 2.5 [23]. Даний дисплей підтримує інтерфейс I2C. Завдяки використанню користувацьких бібліотек можливо налаштувати робочий екран дисплею відповідно до потреб. В нашому випадку на екран буде виводитись наступна інформація: Графік рівня RSSI у реальному часі, максимум/мінімум сигналу.



Рисунок 2.5 OLED дисплей SSD1315

2.4 Розробка електричної схеми

Обрані раніше компоненти необхідно під'єднати один до одного відповідно до розробленої структурної схеми. Для цього використано середовище Altium Designer. Altium Designer — це одна з найпотужніших професійних систем автоматизованого проектування (САПР) друкованих плат, яка поєднує розробку електричних схем, трасування РСВ, симуляцію, моделювання сигналів і механічну інтеграцію в єдиному середовищі. Програма підтримує складні багатошарові плати, високошвидкісні сигнальні лінії, проекти зі специфічними стандартами (наприклад, IPC), а також інтеграцію з системами PLM і 3D CAD. Завдяки інтуїтивному інтерфейсу, потужним інструментам перевірки правил (DRC), розвиненій бібліотечній системі й підтримці спільної роботи над проектами, Altium Designer є вибором інженерів у промисловості, авіоніці, телекомунікаціях та медичній електроніці [24]. На рисунку 2.6 наведено електричну принципову схему приладу.

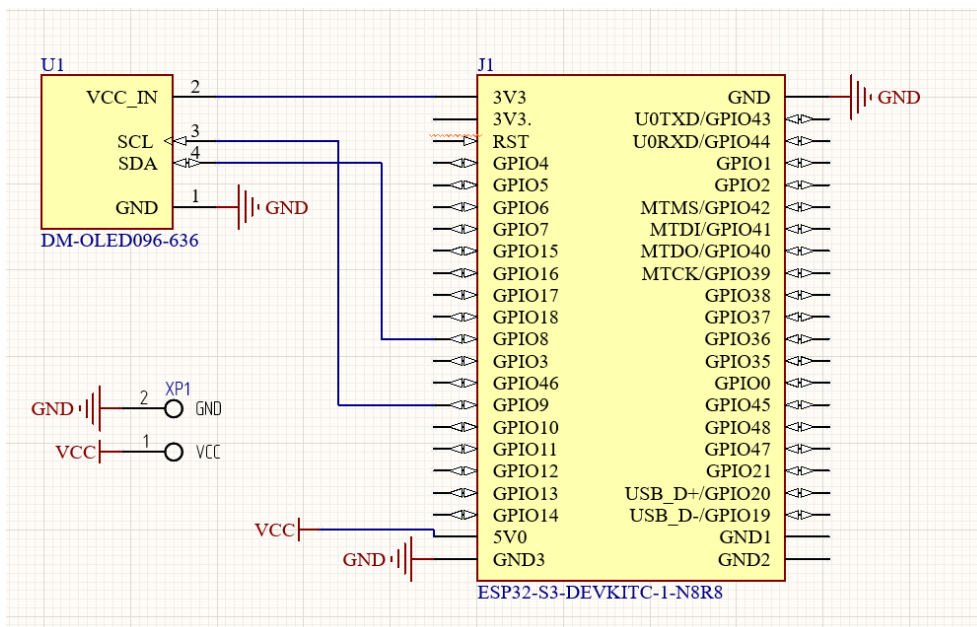


Рисунок 2.6 Електрична принципова схема

На основі даної схеми створено друковану плату, котра забезпечує надійне кріплення всіх елементів. За допомогою середовища Altium Designer проведено розміщення компонентів схеми, проведено трасування для з'єднання відповідних входів/виходів мікроконтролера та периферійних пристроїв. На розробленій платі створено полігон, котрий підключений до землі, що забезпечує зручну та надійну подачу живлення до необхідних елементів.

На рисунку 2.7 наведено зовнішній вигляд друкованої плати. На рисунку 2.8 показано тривимірну модель друкованої плати з встановленим мікроконтролером та екраном.

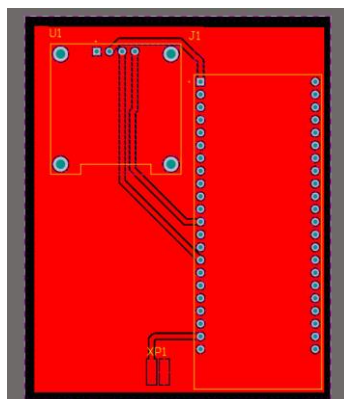


Рисунок 2.7 Друкована плата

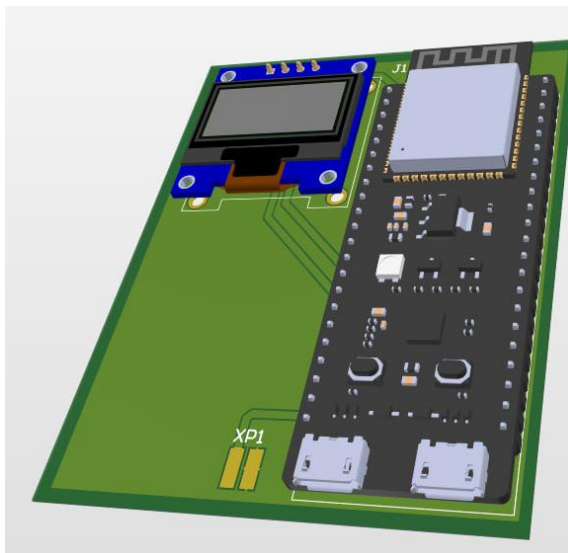


Рисунок 2.8 Тривимірна модель розробленої друкованої плати

2.5 Розробка корпусу

Для прототипу пеленгатора розроблено корпус, який забезпечує кріплення друкованої плати та антени, елементи живлення. За допомогою середовища SolidWorks було створено модель корпусу, експортовано модель друкованої плати та компонентів. Створено збірку, що показує кінцевий вигляд продукту, дана збірка наведена на рисунку 2.9 Створено технічні отвори для кріплення антени, вхідних портів мікроконтролера.

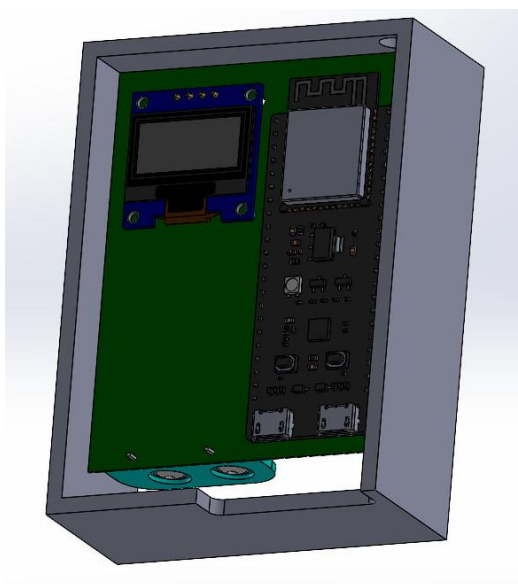


Рисунок 2.9 Тривимірна модель корпусу без кришок

Корпус виготовлений за технологією 3-D друку, яка дозволяє швидко отримати деталі необхідної форми. Властивості обраного матеріалу забезпечують виконання поставлених завдань.

2.6 Створення програмного забезпечення

Для створення програмного забезпечення було вибрано Arduino IDE, через простоту та сумісність з платами типу ESP32. Тому перед початком розробки, потрібно було зайти в BOARDS MANAGER та додати потрібний пакет для роботи з мікроконтролер який використовується. Суть написаної програми полягає в тому, що нам потрібно виводити оброблену мікроконтролером інформацію на олед екран.

2.6.1 Код для відображення рівня сигналу (RSSI) Wi-Fi

В коді було використано такі бібліотеки:

- Wire.h — використовується для підключення OLED дисплея (створена для роботи з I2C-шиною)
- U8g2lib.h — бібліотека для роботи з OLED дисплеєм (вона забезпечує ініціалізацію дисплея та виведення тексту, графіки, рамок і заповнених фігур)
- WiFi.h — бібліотека для роботи з Wi-Fi модулем ESP32 (використовується для сканування доступних мереж та отримання їх параметрів)

При ініціалізації пристрою (функція -- setup()) ми виконуємо:

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  u8g2.begin();
  u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tf);

  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.disconnect();
  delay(100);
}
```

Рисунок 2.10 Опис функції ініціалізації (setup())

- Serial.begin(115200); — ініціалізація серійного монітора зі швидкістю 115200 для виведення службової інформації.
- u8g2.begin() — ініціалізація OLED дисплея.

- `u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tf)` — встановлення шрифту для виведення тексту.
- `WiFi.mode(WIFI_STA)` — перемикає ESP32 в режим клієнта для сканування мереж.
- `WiFi.disconnect()` — відключення від усіх підключених мереж, якщо такі будуть (функція для забезпечення безпеки роботи коду, з точки зору передбачення майбутніх помилок).
- `delay(100)` — затримка для завершення ініціалізації Wi-Fi

Під час основного циклу мікроконтролера (функція – `loop()`) ми виконуємо:

- `int n = WiFi.scanNetworks()` – отримуємо кількість доступних мереж
- `for (int i = 0; i < n && i < 10; i++) { ... }` – рядок 30, за рахунок циклу зчитуємо назву та рівень кожного сигналу та записуємо в масив створеної структури `NetworkInfo` який складається відразу із двох значень.
- `for (int i = 0; i < n - 1 && i < 9; i++) { ... }` – рядок 36, сортуємо за спаданням рівня сигналу, щоб потім виводити тільки найпотужніші сигнали, вивести всі не є можливим, через обмеження олед дисплею.

Починаючи з 46 рядку працюємо з відображенням даних на екран, працюємо з бібліотекою `U8g2lib.h` -- використовуючи такі функції:

- `u8g2.clearBuffer()` -- Очищається буфер дисплея
- `u8g2.drawStr(0, 12, "WiFi Networks RSSI")` -- виводиться статичний заголовок
- `u8g2.sendBuffer()` – здійснюється оновлення дисплею

В кінці вказана затримка в 2 секунди, тому інформація на екрані оновлюється кожні дві секунди. Меншу затримку ставити не має сенсу бо тоді мікроконтролер не зможе коректно закінчувати сканування

Розроблений код – виконує завдання, сканує доступні мережі, обробляє отримані дані, відображає їх на олед дисплеї.

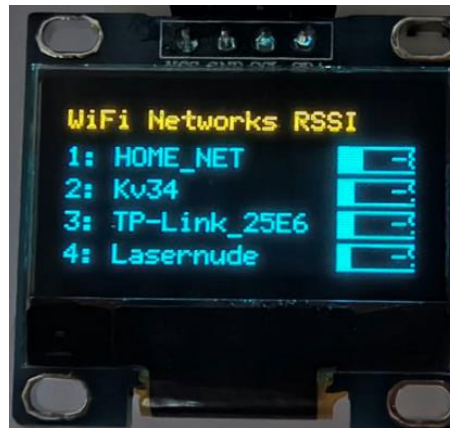


Рисунок 2.11 Тестування працездатності коду,
вивід інформації на OLED дисплей

2.6.2 Код для відображення рівня сигналу (RSSI) BLE

Цей код був розроблений за аналогією так як, для забезпечення роботи обох діапазонів – не вистачало пам'яті на мікроконтролері.

Було додано бібліотеку BLEDevice.h - для роботи з BLE, та прибрано WiFi.h. Також було змінено назву структури для сортування пристроїв на -- struct BleDevice . Для обробки даних було використано функції з доданої бібліотеки. Також було створено клас для обробки знайдених пристроїв так як блютуз сканування надає нам більше інформації про пристрій.

Цей створений по аналогії код, теж виконував поставлені задачі:



Рисунок 2.12 Тестування працездатності коду , вивід інформації на OLED
дисплей

2.7 Тестування в експериментальних умовах

Провели тестування в експериментальних умовах , взяли джерело 2.4 ГГц випромінювання та розташували в 10 метрах від пристрою, потім змінювали напрям направленої антени та бачили різницю на шкалі OLED екрану.

В першому випадку, який можна побачити на рисунку 2.13, направили антену під 90 градусів до джерела випромінювання.

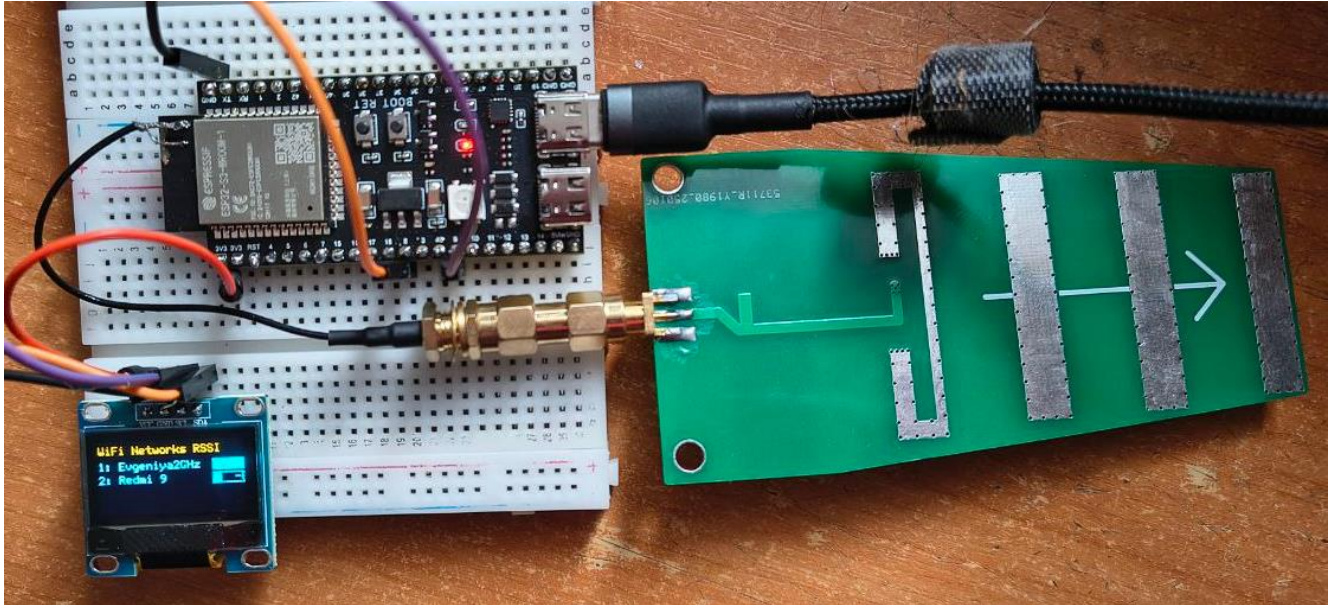


Рисунок 2.13 Антена направлена під 90 градусів до джерела

В другому випадку, на рисунку 2.14, направили антену прямо на джерело випромінювання.

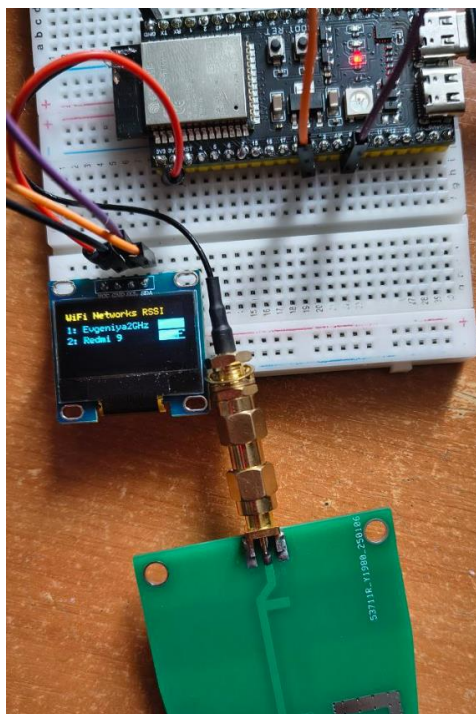


Рисунок 2.14 Направили антену прямо на джерело

Як показує експеримент, прилад працює коректно. Джерело живлення має SSID –Redmi 9. Можемо детальніше порівняти шкалу:



Рисунок 2.15 Графічне відображення рівнів RSSI

ВИСНОВКИ

У даній роботі було розглянуто сферу застосування діапазону 2.4 ГГц, бездротові протоколи зв'язку та мережі, що працюють на цій частоті, зокрема Wi-Fi, Bluetooth та інші. Описано методи пеленгації джерел радіовипромінювання, проаналізовано їх принципи роботи, переваги, недоліки та реалізацію в сучасних технічних пеленгаційних приладах.

Складено електричну структурну та принципову схеми пристрою, спроектовано друковану плату та розроблено корпус для її збирання.

Для забезпечення необхідного функціоналу розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера ESP32-S3-WROOM-1 з використанням інтегрованого середовища розробки Arduino IDE. Програма забезпечує зчитування рівня сигналу (RSSI), обробку даних і виведення результатів.

Отримані результати підтвердили працездатність пристрою та доцільність його застосування для базових завдань пеленгації джерел радіосигналів у діапазоні 2.4 ГГц. Розроблене рішення може бути основою для подальшого вдосконалення й розширення функціональних можливостей системи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Стандарти Wi-Fi: IEEE 802.11ac, 802.11ax і стандарти бездротового Інтернету | Dell Ukraine [Electronic resource]. URL: <https://www.dell.com/support/contents/uk-ua/article/product-support/self-support-knowledgebase/networking-wifi-and-bluetooth/wi-fi-network-standards-overview> (accessed: 13.06.2025).
2. Що таке Wi-Fi 2.4 ГГц та 5 ГГц? Чим відрізняються стандарти Wi-Fi b/g/n/ac та ax? - Інтернет-магазин КТС [Electronic resource]. URL: https://ktc.ua/blog/shho_take_wi-fi_2_4_ggc_ta_5_ggc_chim_vidriznyayutsya_standart_i_wi-fi_bgnac_ta_ax.html (accessed: 13.06.2025).
3. List of 2.4 GHz Radio Use | Encyclopedia MDPI [Electronic resource]. URL: <https://encyclopedia.pub/entry/33343> (accessed: 13.06.2025).
4. Gupta N. Inside Bluetooth Low Energy, Second Edition // J Chem Inf Model. 2016. P. 456.
5. Ramya C.M., Shanmugaraj M., Prabakaran R. Study on ZigBee technology // ICECT 2011 - 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology. 2011. Vol. 6. P. 297–301.
6. eCFR :: 47 CFR 97.313 -- Transmitter power standards. [Electronic resource]. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-D/part-97/subpart-D/section-97.313> (accessed: 13.06.2025).
7. Wi-Fi and Non Wi-Fi Interference | MetaGeek [Electronic resource]. URL: <https://www.metageek.com/training/resources/wifi-and-non-wifi-interference/> (accessed: 13.06.2025).
8. Антена HappyModel Мохон 2.4G купити - Інтернет-магазин FPV квадрокоптерів та дронів в Україні [Electronic resource]. URL: https://flymod.net/item/happymodel_mохон_24g (accessed: 13.06.2025).
9. Mavic Pro - Product Information - DJI [Electronic resource]. URL: <https://www.dji.com/global/mavic/info> (accessed: 13.06.2025).

10. Початок роботи з методом радіопеленгації - знання [Electronic resource]. URL: <https://ua.ecomeradio.com/info/getting-started-with-the-method-of-radio-direc-81523949.html> (accessed: 13.06.2025).
11. Принципи вимірювання координат, реалізовані в рлс ртв [Electronic resource]. URL: <https://studfile.net/preview/7152948/> (accessed: 13.06.2025).
12. Негода Н.В. Портативна радіолокаційна система виявлення та пеленгації джерел електромагнітного випромінювання БПЛА. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.
13. Радіоелектронна розвідка — Вікіпедія [Electronic resource]. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%96%D0%BE%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0_%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BA%D0%B0 (accessed: 13.06.2025).
14. Аварійний радіомаяк Artex ME406 - купити в Києві, ціна в Україні | Crewshop [Electronic resource]. URL: <https://crewshop.ua/oborudovanie-avionika-svyaz/bortovoe-oborudovanie/avarijnye-radiomayaki-plb/avarijnij-radiomayak-artex-me406> (accessed: 13.06.2025).
15. У II кварталі 2018 року фахівці з радіочастотного моніторингу УДЦР виявили та усунули 264 радіозавади (фото) - Тверезий погляд [Electronic resource]. URL: <https://tverezo.info/post/63340> (accessed: 13.06.2025).
16. PLASTUN-RP3000 – infozahyst.com [Electronic resource]. URL: <https://infozahyst.com/product/plastun-rp3000-ua/> (accessed: 13.06.2025).
17. Детектор дронів 0.9, 1.2, 2.4, 4.9 - 6.0 Ghz MDDSR1 “Ксеон-L” - купити за найкращою ціною в Рівненській області від компанії “Ксеонікс Технолоджі” - 2401851913 [Electronic resource]. URL: https://kseonics-smart.com.ua/ua/p2401851913-detektor-dronov-ghz.html?source=merchant_center&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=03&utm_campaign=03&utm_source=google&utm_medium=cpc&gad_source=1&gad_campaignid=21121475938&gbraid=0AAAAAp1TShqjtLKQVJ2x_-P68d3meyrtC&gclid=Cj0KCQjwmK_CBhCEARIsAMKwcD6Vrk6hLGI9wcKwyCl-

9IqWeMcqxWCCY5L5qHRb-GTIu2fHMJ8mArwaAqkUEALw_wcB (accessed: 13.06.2025).

18. Детектор БПЛА TinySA Ultra 2.0 (зі світло-звуковим сповіщенням) [Electronic resource]. URL: https://inlab.kyiv.ua/shop/tinysa-ultra-2?variant=50&gad_source=1&gad_campaignid=22382907023&gbraid=0AAAAA_JVE xaDLXxF53wz39FSLP8CnAa03&gclid=Cj0KCQjwmK_CBhCEARIsAMKwcD5lRW r1O33xwAQ9V3pPNajKz04dF0UrLwjaALfwiPI2jSAaGhXUo_IaAtczEALw_wcB (accessed: 13.06.2025).

19. Основи радіолокації [Electronic resource]. URL: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/an19.uk.html> (accessed: 13.06.2025).

20. ESP32S3 datasheet(1/7 Pages) ESPRESSIF | ESP32-S3-DevKitC-1 [Electronic resource]. URL: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/1642038/ESPRESSIF/ESP32S3/566/1/ESP32S3.html> (accessed: 13.06.2025).

21. Мікросхема ESP32-S3-WROOM-1-N8 Espressif Systems - купити в Києві Філур Електрик [Electronic resource]. URL: <https://filur.net/ua/mikroshema-esp32-s3-wroom-1-n8> (accessed: 13.06.2025).

22. 10-1PCS 2.4G 10.5dB WIFI Yagi Directional Antenna SMA-K Interface Signal Boost Image Transmission Aerial 2.35-2.55GHZ For Yagi - AliExpress 509 [Electronic resource]. URL: https://www.aliexpress.com/item/1005007234072495.html?spm=a2g0o.productlist.main.18.6a2e1f3cAFs9h0&algo_pvid=c23e58b3-7934-460a-9eca-3533065ed5ae&algo_exp_id=c23e58b3-7934-460a-9eca-3533065ed5ae-17&pdp_ext_f=%7B%22order%22%3A%2223%22%2C%22eval%22%3A%221%22%7D&pdp_npi=4%40dis%21GBP%2110.14%213.11%21%21%2195.71%2129.33%21%40211b61ae17498218183963557eebef%2112000039900519346%21sea%21UK%210%21ABX&curPageLogUid=28sn2y6ybM3e&utparam-url=scene%3Asearch%7Cquery_from%3A#nav-specification (accessed: 13.06.2025).

23. Дисплей 0.96" I2C 128x64 (жовто-синій) SSD1315 купити в Києві та Україні [Electronic resource]. URL: <https://arduino.ua/prod7356-displei-0-96-i2c->

128x64-jovto-sinii-ssd1315?srsltid=AfmBOorUVGJJ-6lfv58uCMTb__FCThNo2lmtTp16szBS-_EBkiwib6uB (accessed: 13.06.2025).

24. PCB Design Software & Tools | Altium [Electronic resource]. URL: https://www-altium-com.translate.google/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=uk&_x_tr_hl=uk&_x_tr_pto=sc (accessed: 13.06.2025).

ДОДАТОК А

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЕРУ ESP 32

Програма для пеленгації Wi-Fi мереж в діапазоні 2.4 ГГц:

```
#include <Wire.h>
#include <U8g2lib.h>
#include <WiFi.h>

#define I2C_SDA 8
#define I2C_SCL 9

U8G2_SSD1306_128X64_NONAME_F_HW_I2C u8g2(U8G2_R0, U8X8_PIN_NONE, I2C_SCL, I2C_SDA);

struct NetworkInfo {
  String ssid;
  int32_t rssi;
};

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  u8g2.begin();
  u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tf);

  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.disconnect();
  delay(100);
}

void loop() {
  int n = WiFi.scanNetworks();

  NetworkInfo networks[10];

  for (int i = 0; i < n && i < 10; i++) {
    networks[i].ssid = WiFi.SSID(i);
```

```

networks[i].rssi = WiFi.RSSI(i);
}

for (int i = 0; i < n - 1 && i < 9; i++) {
  for (int j = 0; j < n - i - 1 && j < 9; j++) {
    if (networks[j].rssi < networks[j + 1].rssi) {
      NetworkInfo temp = networks[j];
      networks[j] = networks[j + 1];
      networks[j + 1] = temp;
    }
  }
}

u8g2.clearBuffer();

u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tr);
u8g2.drawStr(0, 12, "WiFi Networks RSSI");

for (int i = 0; i < n && i < 5; i++) {
  // Обрізаємо SSID до 15 символів (щоб помістилось)
  String ssidShort = networks[i].ssid;
  if (ssidShort.length() > 15) {
    ssidShort = ssidShort.substring(0, 15);
  }

  char line[32];
  snprintf(line, sizeof(line), "%d: %-15s %4d dBm", i + 1, ssidShort.c_str(), networks[i].rssi);
  u8g2.drawStr(0, 24 + i * 12, line);

  int barLength = map(networks[i].rssi, -100, -30, 0, 50);
  if (barLength < 0) barLength = 0;
  if (barLength > 50) barLength = 50;

  u8g2.drawFrame(100, 16 + i * 12, 52, 10);
  u8g2.drawBox(101, 17 + i * 12, barLength, 8);
}

u8g2.sendBuffer();

```

```

delay(5000);
}

```

Програма для пеленгації BLE девайсів:

```

#include <Wire.h>
#include <U8g2lib.h>
#include <BLEDevice.h>

#define I2C_SDA 8
#define I2C_SCL 9

U8G2_SSD1306_128X64_NONAME_F_HW_I2C u8g2(U8G2_R0, U8X8_PIN_NONE, I2C_SCL, I2C_SDA);

struct BleDevice {
  String name;
  int rssi;
};

#define MAX_DEVICES 10
BleDevice devices[MAX_DEVICES];
int deviceCount = 0;

class MyAdvertisedDeviceCallbacks: public BLEAdvertisedDeviceCallbacks {
  void onResult(BLEAdvertisedDevice advertisedDevice) {
    if (deviceCount >= MAX_DEVICES) return;

    String name = advertisedDevice.getName().c_str(); // перетворюємо
    if (name.length() == 0) return;

    devices[deviceCount].name = name;
    devices[deviceCount].rssi = advertisedDevice.getRSSI();
    deviceCount++;
  }
};

```

```

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  u8g2.begin();
  u8g2.setFont(u8g2_font_6x12_tf);

  BLEDevice::init("");
  BLEScan* pBLEScan = BLEDevice::getScan();
  pBLEScan->setAdvertisedDeviceCallbacks(new MyAdvertisedDeviceCallbacks());
  pBLEScan->setActiveScan(true);
  pBLEScan->setInterval(100);
  pBLEScan->setWindow(99);
}

void loop() {
  deviceCount = 0;

  BLEScan* pBLEScan = BLEDevice::getScan();
  pBLEScan->start(5, false); // Сканирование на 5 секунд
  pBLEScan->clearResults();

  for (int i = 0; i < deviceCount - 1; i++) {
    for (int j = 0; j < deviceCount - i - 1; j++) {
      if (devices[j].rssi < devices[j + 1].rssi) {
        BLEDevice tmp = devices[j];
        devices[j] = devices[j + 1];
        devices[j + 1] = tmp;
      }
    }
  }

  u8g2.clearBuffer();
  u8g2.drawStr(0, 12, "BLE Devices RSSI");

  for (int i = 0; i < deviceCount && i < 5; i++) {
    String line = String(i + 1) + ": " + devices[i].name + " " + devices[i].rssi + " dBm";
    if (line.length() > 20) line = line.substring(0, 20);
    u8g2.drawStr(0, 24 + i * 10, line.c_str());
  }
}

```

```
int barLength = map(devices[i].rssi, -100, -30, 0, 50);
barLength = constrain(barLength, 0, 50);
u8g2.drawFrame(78, 16 + i * 10, 50, 8);
u8g2.drawBox(79, 17 + i * 10, barLength, 6);
}

u8g2.sendBuffer();
delay(5000);
}
```