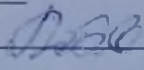


Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

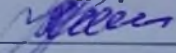
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

ВИКОРИСТАННЯ SDR РАДІО ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ТА ЛЧМ
СИГНАЛІВ

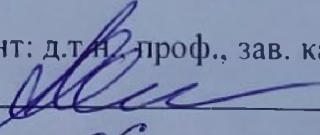
Виконав: студент 2-го курсу, групи ПЗТ-23мс
спеціальності 172 –Електронні комунікації та
радіотехніка

 Рибак Р.А.

Керівник: д.т.н., проф. каф. ІКСТ

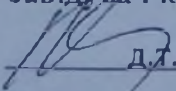
 Крижановський В.Г.
« 11 » 06 2025 р.

Рецензент: д.т.н., проф., зав. каф. ІРТС

 Осадчук О.В.
« 11 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.
« 11 » 06 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

Д.т.н., професор В.М. Кичак

«05» 05 2025 року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Рибаку Роману Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Використання SDR радіо для виявлення імпульсних та ЛЧМ сигналів

керівник роботи:

Крижановський Володимир Григорович, док. техн. наук, професор каф. ІКСТ.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від «20» березня 2025 року № 97

2. Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: дослідження характеристик сучасних SDR – приймачів, огляд програмного забезпечення SDR – приймачів, створення програмного компоненту для виявлення імпульсних та ЛЧМ-сигналів.

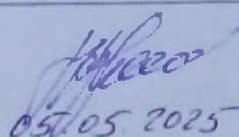
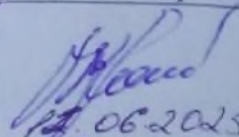
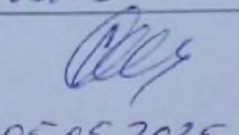
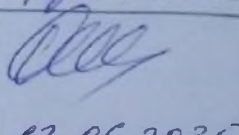
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, основні сфери використання SDR – радіо, огляд програмного забезпечення для обробки та зберігання сигналів SDR – радіо, використання SDR-радіо для виявлення імпульсних та ЛЧМ сигналів, використання GNU радіо для реалізації пошукового алгоритму ЛЧМ та імпульсних сигналів, охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

вигляд основного вікна програми-приймача Cqrx, Вигляд основного вікна утиліти GNU Radio Companion, Вигляд лінійно-частотно модульованого сигналу, Спектр ЛЧМ-сигналу з базою $B = 15$, Схема радіопеленгатора, Вигляд

спектрів сигналів які приймаються панорамним приймачем, Вигляд програмної моделі пеленгатора

6. Консультанти розділів роботи

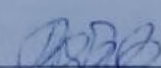
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Крижановський В.Г., д.т.н., проф. каф. ІКСТ	 05.05.2025	 12.06.2025
Охорона праці	Дембіцька С.В. д.п.н., професор кафедри БЖДПБ,	 05.05.2025	 12.06.2025

7. Дата видачі завдання «05» травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

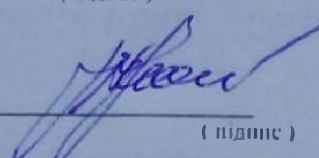
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	06.05.2025р.	
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	19.05.2025р.	
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	02.06.2025р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	06.06.2025р.	
5	Нормоконтроль БКР	09.06.2025р.	
6	Попередній захист БКР	10.06.2025р.	
7	Рецензування БКР	11.06.2025р.	
8	Захист БКР	13.06.2025р.	

Студент


(підпис)

Рибак Р.А.

Керівник роботи


(підпис)

Крижановський В.Г.

АННОТАЦІЯ

Рибак Р.А. Використання SDR радіо для виявлення імпульсних та ЛЧМ сигналів. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 - Електронні комунікації та радіотехніка, освітня програма – програмне забезпечення телекомунікаційних систем. Вінниця: ВНТУ, 2025. 84с. Укр. Мовою Бібліогр.: 16 назв; рис.: 14; табл.. 8.

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена розробці та дослідженню методів використання SDR радіо для виявлення імпульсних та ЛЧМ сигналів. Робота включає огляд особливості імпульсних та ЛЧМ сигналів, огляд основних параметрів сучасних SDR приймачів, розробку програмного забезпечення та комп'ютерне моделювання розроблених методів.

Ключові слова: SDR радіо, програмне керування, імпульсні сигнали, ЛЧМ сигнали.

ANNOTATION

Rybak R.A. Using SDR radio to detect pulse and LFM signals. Bachelor's qualification work in the specialty 172 - Electronic communications and radio engineering, educational program - software for telecommunication systems. Vinnytsia: VNTU, 2025. 84p. Ukrainian. In the language Bibliography: 16 titles; fig.: 14; table. 8.

The bachelor's qualification work is devoted to the development and research of methods for using SDR radio to detect pulse and LFM signals. The work includes a review of the features of pulse and LFM signals, a review of the main parameters of modern SDR receivers, software development and computer modeling of the developed methods.

Keywords: SDR radio, software control, pulse signals, LFM signals.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ОСНОВНІ СФЕРИ ВИКОРИСТАННЯ SDR-РАДІО	11
1.1 Історія розвитку SDR: від концепції до ключової технології зв'язку.....	11
1.2 Основні сфери використання SDR.....	12
1.3 Основні технічні характеристики SDR-пристроїв.....	14
1.4 Переваги використання SDR.....	17
1.5 Огляд SDR-приймачів та їх характеристик.....	18
2 ОГЛЯД ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ ТА ЗБЕРІГАННЯ СИГНАЛІВ SDR	23
2.1 Основні функції та особливості GNU Radio.....	23
2.2 Основні функції та особливості SDRSharp.....	26
3 ВИКОРИСТАННЯ SDR РАДІО ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ТА ЛЧМ СИГНАЛІВ.....	29
3.1 Основні характеристики та сфери використання імпульсних та ЛЧМ сигналів.....	29
3.2 Використання ЛЧМ у галузі телекомунікацій та радіоелектроніки.....	32
3.3 Виявлення імпульсних фазово-кодованих та ЛЧМ радіолокаційних сигналів	34
3.4 Властивості функції належності виявлених сигналів.....	36
3.5 Ефективність детектування	42
4 ВИКОРИСТАННЯ GNU РАДІО ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПОШУКОВОГО АЛГОРИТМУ ЛЧМ ТА ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ.....	49
4.1 Обґрунтування використання GNU Radio для реалізації пеленгатора ЛЧМ та імпульсних сигналів	49
4.2 Реалізація пеленгатора в GNU Radio за алгоритмом кореляційного інтерферометра.....	55
5 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	59
5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	60

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	63
5.3 Виробничі випромінювання.....	68
5.4 Пожежна безпека.....	69
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА.....	76
Додаток Б ПОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	82

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

ЛЧМ – лінійно-частотно модульований сигнал

ФК – фазово-кодована

ФМ ПВП – фазова модуляція керована псевдовипадковою послідовністю

DSP – Digital Signal Processor (цифровий сигнальний процесор)

ESM – Electronic Support Measures (електронна підтримка)

LNA – Low Noise Amplifier (підсилювач із низьким рівнем шуму)

PFA – Probability of False Alarm (щільність амплітуди фактора)

SDR – Software-Defined Radio (програмно-визначений радіоприймач)

SNR – Signal-to-Noise Ratio (співвідношення сигнал/шум)

TF – Time-Frequency Detector (детектор частоти)

WF – Waveform (форма хвилі)

WVD – Wigner-Ville Distribution (перехресний розподіл Вігнера-Вілле)

CDF – Cumulative Density Function (функція кумулятивної густини)

ВСТУП

Актуальність теми. Збереження та обробка сигналів у програмно-визначених радіосистемах (SDR) є важливим елементом сучасної радіоелектроніки. Завдяки гнучкості цієї технології з'являється можливість адаптації до різноманітних частотних діапазонів і протоколів без потреби фізичної заміни апаратної частини.

Однією з ключових можливостей SDR радіо є можливість складної програмної обробки отриманих сигналів, що дозволяє з використанням відносно простої апаратної частини радіотехнічного пристрою реалізувати складні задачі виявлення та аналізу імпульсних та ЛЧМ сигналів. Програмне забезпечення, призначене для збереження та обробки сигналів SDR-приймачів, має забезпечувати високу надійність і здатність працювати з великими обсягами даних.

Значення обробки та збереження даних з SDR-пристроїв постійно зростає з кількох причин. По-перше, з огляду на розширення екосистеми бездротових технологій, обсяг інформації для обробки суттєво збільшується. По-друге, SDR-системи дають змогу здійснювати глибокий спектральний аналіз сигналів — це необхідно як для дослідження навколишнього частотного середовища, так і для виявлення завад чи проектування нових систем зв'язку. По-третє, для державних структур, зокрема військових або розвідувальних, можливість обробки радіосигналів у великій кількості точок аналізу критично важливе з точки зору національної безпеки — вони використовуються для контролю комунікацій і виявлення потенційних загроз. І, нарешті, масова обробка радіоданих відкриває нові можливості для інновацій у галузі телекомунікацій, радіоелектронної боротьби, радіорозвідки дозволяючи дослідникам та розробникам тестувати нові протоколи, алгоритми виявлення та обробки сигналів.

Аналіз останніх досліджень. Тематика використання SDR-пристроїв для виявлення та аналізу радіосигналів є досить актуальною для вітчизняних та закордонних науковців. Зокрема у [1] розглядаються основні можливості SDR-

пристроїв, наводяться характеристики їх апаратної та програмної складової. За посиланням [2] є можливість ознайомитись з основними можливостями програмного забезпечення з відкритим кодом для робіт із SDR-радіо. У роботі [3] розглядаються можливості SDR-радіо, зокрема для використання у мережах мобільного зв'язку.

Останні дослідження підтверджують, що SDR-радіо є потужним інструментом для виявлення імпульсних та ЛЧМ-сигналів. Використання узгоджених фільтрів, систем-на-кристалі та спектрального розширення значно покращує точність виявлення та захист від перешкод.

Мета та постановка задачі. Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є дослідження можливості використання SDR радіо для виявлення імпульсних та ЛЧМ сигналів.

Задачами бакалаврської кваліфікаційної роботи є:

- аналіз можливостей SDR радіо для виявлення імпульсних та ЛЧМ сигналів;
- синтез структурних схем та алгоритмів використання SDR-радіо для виявлення імпульсних та ЛЧМ сигналів.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались на практичних заняттях спеціальних навчальних дисциплін кафедри і оформлюються для обговорення на наукових конференціях ВНТУ у 2025 році.

1 ОСНОВНІ СФЕРИ ВИКОРИСТАННЯ SDR-РАДІО

1.1 Історія розвитку SDR: від концепції до ключової технології зв'язку

Технологія програмно-визначуваного радіо (SDR) не виникла миттєво — її розвиток є результатом поступового переходу від жорстко заданих апаратних рішень до програмно-реалізованих функцій у сфері радіозв'язку[1].

Перші ідеї: зародження концепції (1980–1990-ті роки)

Ідея реалізувати радіоапаратуру переважно за допомогою програмного забезпечення з'явилася ще у 1980-х роках. У цей період військові системи зв'язку шукали способи забезпечити універсальність і гнучкість обладнання без необхідності створення окремих пристроїв під кожен стандарт. Однією з перших практичних реалізацій була система SpeakEasy, розроблена за замовленням Міністерства оборони США у 1990-х роках. Вона дозволяла одній апаратній платформі працювати з різними протоколами радіозв'язку — що тоді вважалося проривом.

Технологічний прорив: поява цифрової обробки сигналів

З появою більш потужних процесорів і спеціалізованих мікросхем цифрової обробки сигналів (DSP — Digital Signal Processor) SDR почало набувати практичної форми. Можливість обробляти аналогові сигнали у цифровому вигляді в реальному часі стала визначальною передумовою для реалізації програмно-керованих приймачів та передавачів.

Комерціалізація і відкриті стандарти (2000–2010 роки)

У 2000-х роках концепція SDR вийшла за межі військового використання. З'явилися перші комерційні продукти, які дозволяли радіоаматорам та інженерам використовувати SDR для аналізу спектру, цифрових передач або створення власних форматів зв'язку. Такі проекти, як GNU Radio (open-source середовище для створення SDR-додатків), стали каталізаторами масового зацікавлення у спільноті розробників.

Також у цей період з'являються стандарти типу SDR Forum (тепер — Wireless Innovation Forum), які формалізують вимоги до SDR-систем і сприяють уніфікації розробок.

SDR сьогодні: масовий ринок і наукові інновації (2010–2025-ті)

У сучасному вигляді SDR охоплює як професійний, так і побутовий сегмент. Поява доступних платформ, таких як RTL-SDR, HackRF, USRP (Universal Software Radio Peripheral), дала змогу широкому загалу працювати з радіосигналами без значних фінансових витрат. Сучасні SDR-пристрої здатні охоплювати широкі частотні діапазони (від кГц до ГГц) та підтримують десятки протоколів — від FM і Wi-Fi до LTE та GNSS.

Крім телекомунікацій, SDR використовується в таких сферах, як:

- наукові дослідження в астрономії та атмосферних явищах;
- системи радіомоніторингу;
- прототипування бездротових систем 6G;
- безпілотні системи зв'язку;
- системи цифрової розвідки та електронної боротьби.

1.2 Основні сфери використання SDR

Програмно-визначуване радіо (SDR, Software Defined Radio) — це інноваційна технологія, що реалізує обробку радіосигналів за допомогою програмного забезпечення, замість класичних апаратних схем. Такий підхід дозволяє досягти високого рівня адаптивності та функціональної гнучкості, що є особливо важливим у сучасних умовах стрімкої еволюції бездротових і телекомунікаційних технологій[2].

Суть SDR полягає в тому, що більшість операцій із приймання, перетворення, аналізу та передавання сигналу виконується не апаратними засобами, а за допомогою програмного коду. У типових реалізаціях SDR функціональність радіостанції забезпечується персональним комп'ютером або спеціалізованим цифровим процесором, який керується програмою[2,3]. Така

архітектура відкриває можливості для реалізації широкого спектра функцій без фізичного втручання в апаратну частину.

Головна перевага SDR — його надзвичайна універсальність. Зміна робочої частоти, типу модуляції, протоколу передавання чи інших характеристик здійснюється програмним шляхом. Це дозволяє легко адаптувати пристрій до нових стандартів зв'язку, швидко оновлювати функціональність та забезпечувати сумісність із різними системами. Економія на апаратному забезпеченні і можливість швидкої модифікації функцій без заміни обладнання роблять SDR ефективним рішенням як у технічному, так і в фінансовому плані[4]. Один і той самий SDR-пристрій може виконувати функції кількох радіомодулів — приймача, передавача, аналізатора спектру тощо.

Застосування програмно-визначуваного радіо охоплює широкий спектр сфер. У телекомунікаціях SDR використовується як інструмент для проєктування, тестування та впровадження нових мобільних стандартів — зокрема 4G, 5G та майбутніх систем. У сфері оборони ця технологія дозволяє створювати зв'язкові комплекси, здатні автоматично підлаштовуватись під зміни середовища, зокрема під вплив перешкод або зміни протоколів противника. Для радіоаматорів SDR відкриває новий рівень дослідження та експериментів із передачею, прийманням і обробкою сигналів, включно з розробкою власних форматів зв'язку.

Додаткові сфери застосування SDR

Окрім широкого використання у сфері телекомунікацій, програмно-визначуване радіо (SDR) впевнено входить у спеціалізовані галузі. Зокрема, у космічних дослідженнях ця технологія дозволяє обробляти сигнали з орбітальних апаратів, де традиційне обладнання було б занадто громіздким або негнучким. Університети та наукові центри активно застосовують SDR для навчання майбутніх інженерів і для проведення досліджень у сфері радіотехніки, сигналопроцесування та зв'язку. SDR також виконує важливу роль у розбудові інфраструктури Інтернету речей (IoT), де гнучкість у налаштуванні протоколів передавання даних є критично важливою. У сфері

авіації технологія використовується для підвищення ефективності систем зв'язку та навігації, адаптуючись до умов реального часу[3,4].

1.3 Основні технічні характеристики SDR-пристроїв

1. Частотний діапазон

Визначає межі частот, у яких SDR може працювати на прийом або передачу. *Приклад:* RTL-SDR підтримує діапазон 24 МГц – 1,7 ГГц, тоді як HackRF One — від 1 МГц до 6 ГГц.

2. *Пропускна здатність (Bandwidth)* Означає ширину частотної смуги, яку пристрій може обробити одночасно. *Приклад:* RTL-SDR має до 3,2 МГц, LimeSDR — до 61,44 МГц.

3. *Частота дискретизації (Sampling Rate)* Кількість вибірок сигналу, які фіксуються за одну секунду, що впливає на точність цифрового представлення. *Приклад:* RTL-SDR — до 2,048 МГц, HackRF One — до 20 МГц.

4. *Розрядність АЦП (ADC Bit Depth)* Кількість бітів, якими представлена кожна вибірка. Більша розрядність забезпечує кращу якість і динамічний діапазон. *Приклад:* RTL-SDR — 8 бітів, LimeSDR — 12 бітів.

5. *Вхідна чутливість* Мінімальний рівень сигналу, який приймач може розпізнати без значних спотворень. Покращується за рахунок використання підсилювачів з низьким рівнем шуму (LNA).

6. *Фільтрація сигналів* Наявність вбудованих фільтрів (низьких, високих, смугових частот) дозволяє ефективно відокремлювати корисний сигнал від завад. У деяких SDR-фільтри налаштовуються програмно.

7. *Інтерфейс підключення* Тип фізичного з'єднання між SDR і обчислювальним пристроєм. *Приклад:* RTL-SDR використовує USB 2.0, HackRF One — USB 2.0 та GPIO-порти.

8. *Модульність системи* Можливість підключення додаткових плат або модулів для розширення функціоналу. *Приклад:* LimeSDR підтримує змінні модулі для роботи в різних частотних діапазонах.

9. *Програмне забезпечення* Функціональність SDR значною мірою визначається підтримуваними програмами. *Приклади:* GNU Radio, SDRSharp, HDSDR. Вони дозволяють не лише візуалізувати сигнали, а й реалізувати складні алгоритми обробки[4].

Досить часто як платформа для прийому та передачі радіосигналів використовується Raspberry Pi 4, який є енергоефективним, компактним та досить потужним мікрокомп'ютером. Однак при роботі з SDR необхідно уважно враховувати апаратні обмеження, оскільки надмірне навантаження на систему може призвести до втрат даних, пропусків вибірок або спотворення сигналу.

Ключові фактори, що впливають на оптимальну кількість вибірок:

- Оперативна пам'ять. Raspberry Pi 4 доступний у модифікаціях з 2, 4 і 8 ГБ RAM. Для ефективного буферизування сигналу бажано мати щонайменше 4 ГБ оперативної пам'яті, що дозволяє зберігати декілька мегабайтів сигналу в оперативній пам'яті без залучення повільнішої SD-карти.
- Частота дискретизації. На практиці, частота 1 МГц є компромісною: вона забезпечує досить хорошу роздільну здатність для більшості тестових сигналів і не перевантажує системні ресурси. Вищі частоти можуть створити значне навантаження на CPU та I/O-систему.
- Продуктивність накопичувача. Запис великої кількості вибірок доцільно здійснювати на високошвидкісні SSD або UHS-I/UHS-II SD-карти, оскільки швидкість запису на диск може стати вузьким місцем.
- Можливості процесора. Чотириядерний ARM Cortex-A72 (1,5 ГГц) здатен обробляти дані у режимі реального часу, але тривала обробка без проміжного збереження може спричинити перегрів і тротлінг.

Розрахунок оптимального буфера при частоті 1 МГц

Частота дискретизації 1 МГц означає, що кожен пристрій приймає 1 000 000 вибірок. За умови використання 8-бітного АЦП (1 байт на вибірку), отримаємо:

- 1 секунда сигналу $\approx$ 1 МБ даних
- 10 секунд запису $\approx$ 10 МБ

- 1 хвилина запису ≈ 60 МБ

На практиці буфер сигналу часто розраховують з урахуванням короткотермінового зберігання — наприклад, по 5 секунд або 10 секунд, щоб обробити частину сигналу, зберегти або передати на сервер, а потім звільнити пам'ять. Для Raspberry Pi 4 з 4 ГБ RAM це означає, що можна безпечно зберігати буфер до $\sim 200\text{--}300$ МБ, тобто до 3–5 хвилин запису при частоті 1 МГц без серйозного ризику переповнення пам'яті.

Таблиця 1.1 – Визначення оптимальної кількості виборок

Частота дискретизації 1МГц	Частоті дискретизації 2.048МГц
Об'єм можливих записаних даних=20МБ	Об'єм можливих записаних даних=20МБ
Тривалість періоду запису=10секунд	Тривалість періоду запису=4.88секунд

Як показали результати експериментів, при однаковому обсязі файлу (20 МБ), збільшення частоти дискретизації до 2.048 МГц зменшує тривалість запису сигналу майже вдвічі у порівнянні з частотою 1 МГц. Зокрема, тривалість запису файлу обсягом 20 МБ становить приблизно 4.88 секунд при частоті 2.048 МГц, що свідчить про вищу щільність даних у часі.

Для Raspberry Pi 4 кількість 10 000 000 виборок можна вважати оптимальною з огляду на баланс між продуктивністю системи, використанням оперативної пам'яті та можливістю оперативної передачі даних на сервер. У такій конфігурації файл обсягом 20 МБ зберігається у буфер оперативної пам'яті без перевантаження, що критично важливо для уникнення втрат сигналу в реальному часі.

Крім того, передача файлу такого розміру по локальній мережі відбувається з мінімальними затримками, що дозволяє зберігати безперервність збору та обробки сигналів. Подальше розбиття файлу на кілька частин додатково полегшує передачу та знижує ризик помилок у процесі транспортування даних.

Таким чином, 10 млн вибірок при частоті 2.048 МГц та розмірі 20 МБ є раціональним компромісом для системи на базі Raspberry Pi 4, за умов наявності щонайменше 4 ГБ оперативної пам'яті. Така конфігурація забезпечує стійкість до навантажень, стабільність передачі та відповідність вимогам реального часу.

1.4 Переваги використання SDR

Програмно-визначуване радіо (SDR) має низку ключових переваг, що робить його надзвичайно привабливим рішенням у багатьох сферах радіозв'язку та цифрової обробки сигналів[2,3,4]. Найважливішими перевагами цієї технології є:

- Гнучкість конфігурації: SDR дозволяє змінювати параметри роботи (частоти, модуляцію, протоколи тощо) шляхом оновлення програмного забезпечення без необхідності зміни апаратної частини. Це значно скорочує час розробки і впровадження нових систем зв'язку.
- Універсальність та масштабованість: Один і той самий апаратний комплекс може бути використаний для реалізації широкого спектра задач — від аматорських приймачів до військових радіостанцій, що забезпечує значну економію ресурсів.
- Зниження витрат: Завдяки перенесенню функцій традиційних радіокомпонентів (модулятори, демодулятори, фільтри тощо) у програмну площину, зменшуються витрати на виготовлення і обслуговування обладнання.
- Можливість інтеграції з сучасними протоколами та мережами: SDR легко адаптується до сучасних бездротових стандартів (LTE, 5G, Wi-Fi, Bluetooth) та підтримує багато існуючих і перспективних форматів зв'язку.
- Придатність до автоматизованої обробки сигналів: Використання SDR у поєднанні з методами цифрової обробки сигналів (DSP), штучного інтелекту або машинного навчання відкриває перспективи для створення інтелектуальних систем зв'язку.

Втім, разом з перевагами SDR має і низку викликів:

- Високі вимоги до обчислювальних ресурсів: Обробка сигналів у реальному часі вимагає потужних процесорів, високошвидкісної пам'яті та стабільних систем зберігання.
- Складність розробки програмного забезпечення: Необхідні глибокі знання як в області цифрової обробки сигналів, так і у програмуванні на низькому рівні (наприклад, з використанням GNURadio, C++ або Python).
- Питання безпеки: Гнучкість SDR робить його потенційно вразливим до кібератак, особливо у критичних системах, тому виникає потреба у впровадженні надійних методів шифрування та захисту.

1.5 Огляд SDR-приймачів та їх характеристик

Програмно-визначувані радіоприймачі (SDR-приймачі) є спеціалізованими пристроями, в яких обробка радіосигналів, на відміну від традиційних приймачів, виконується не за допомогою фіксованої апаратної логіки, а за рахунок програмного забезпечення. Такий підхід забезпечує високий ступінь гнучкості, масштабованості та можливість багаторазового перепрофілювання пристрою під нові задачі.

Основні типи SDR-приймачів:

1. Аматорські приймачі загального призначення (Low-cost SDR):
RTL-SDR — один з найпопулярніших і найдоступніших SDR-приймачів.
 - Частотний діапазон: 24 МГц – 1.7 ГГц
 - Частота дискретизації: до 2.048 МГц
 - ADC: 8-біт
 - Інтерфейс: USB 2.0
 - Особливості: дешевий, ідеальний для простих задач (FM-радіо, ADS-B, телеметрія)
2. Універсальні широкосмугові приймачі середнього класу:
 - HackRF One
 - Частотний діапазон: 1 МГц – 6 ГГц
 - Ширина смуги (Bandwidth): до 20 МГц

- ADC: 8-біт
- Особливості: підтримує як прийом, так і передачу; підходить для експериментів з широким спектром протоколів

3. Професійні приймачі високої точності:

- LimeSDR
- Частотний діапазон: 100 кГц – 3.8 ГГц
- Ширина смуги: до 61.44 МГц
- ADC: 12-біт
- Інтерфейс: USB 3.0
- Особливості: повна дуплексна передача, підтримка MIMO, відкритий вихідний код, розширена програмна підтримка (GNURadio, Pothos, MATLAB)

4. Високопродуктивні SDR для дослідницьких і оборонних задач:

- USRP (Universal Software Radio Peripheral) від Ettus Research
- Частотний діапазон: в залежності від плат розширення — від десятків кГц до десятків ГГц
- Пропускна здатність: до сотень МГц
- ADC: 12–16 біт
- Інтерфейс: Gigabit Ethernet, USB 3.0, PCIe
- Особливості: застосовується в наукових, промислових і оборонних системах; повністю масштабований; підтримка великих обсягів даних

Основні параметри для порівняння SDR-приймачів:

- Частотний діапазон — визначає спектр сигналів, які пристрій здатен приймати або передавати.
- Розрядність АЦП (ADC Bit Depth) — впливає на динамічний діапазон і точність відтворення сигналу.
- Ширина смуги пропускання — кількість спектру, який обробляється одночасно.
- Інтерфейси підключення — визначають швидкість передачі даних (USB 2.0/3.0, Ethernet, PCIe).

– Можливість передачі — деякі приймачі також можуть передавати сигнали (наприклад, HackRF One, LimeSDR).

Сфера застосування:

SDR-приймачі використовуються у наукових дослідженнях, системах моніторингу спектру, аматорському радіо, розробці мобільного зв'язку, навігаційних системах, сигнальній розвідці, автоматизованих системах керування та багатьох інших галузях.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд RTL-SDR

Основні компоненти SDR-приймача включають антену, аналого-цифровий перетворювач (АЦП), обчислювальний пристрій (наприклад, комп'ютер або спеціалізований цифровий сигнальний процесор), а також відповідне програмне забезпечення. Антена приймає радіосигнали з різних діапазонів і передає їх до АЦП, який перетворює аналоговий сигнал у цифрову форму. Цифрові дані далі обробляються програмно на комп'ютері або DSP: виконуються операції модуляції, демодуляції, фільтрації та інші види обробки. Результати можуть бути представлені у вигляді звуку, тексту або графіки на екрані користувача.

SDR-приймачі мають суттєві переваги. Їх головна перевага — гнучкість, оскільки програмні зміни дозволяють працювати з різними частотами та стандартами без фізичної заміни апаратних частин. Також пристрої

вирізняються адаптивністю до змін навколишнього радіооточення та індивідуальних вимог користувача. Зменшення потреби в дорогому апаратному оновленні робить такі приймачі економічно вигідними. Завдяки високій обчислювальній здатності SDR-приймачі здатні виконувати складні операції з обробки сигналів, що не під силу аналоговим рішенням.

У межах дослідження було проаналізовано кілька популярних моделей SDR-приймачів: RTL-SDR, HackRF One, Airspy та BladeRF. Їх основні технічні характеристики наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика SDR-приймачів

Модель	Частотний діапазон	Пропускна здатність	ADC	Інтерфейс	Можливість передачі	Особливості
RTL-SDR	24 МГц – 1.7 ГГц	до 3.2 МГц	8біт	USB 2.0	Немає	Підходить для початкового рівня
HackRF One	1 МГц – 6 ГГц	до 20 МГц	8біт	USB 2.0	Так	Підходить для експериментів з передачею
Airspy R2	24 МГц – 1.8 ГГц	до 10 МГц	12 біт	USB 2.0	Немає	Вища розрядність, менший рівень шумів
BladeRF x40	300 МГц – 3.8 ГГц	до 28 МГц	12 біт	USB 3.0	Так	Підтримка МІМО, програмований ПЛІС (

Таким чином, вибір SDR-приймача значною мірою визначається поставленими завданнями та доступним бюджетом. RTL-SDR є оптимальним варіантом для новачків або для простих задач, особливо у випадках з обмеженими фінансовими можливостями. Натомість HackRF One та Airspy пропонують розширену функціональність, що робить їх придатними для професійного застосування. Для складних наукових або інженерних проектів

найкраще підходить BladeRF, хоча його висока вартість обмежує доступність[5].

У межах даної роботи буде використано RTL-SDR через широке коло користувачів, активну спільноту, підтримку великої кількості програмних платформ і доступну ціну.

Починаючи з 2012 року, SDR-приймачі (Software-Defined Radio) здобули широке визнання завдяки можливості аналізувати ефір у великому діапазоні частот. Ця технологія дозволяє приймати та обробляти сигнали з різних джерел, що робить її незамінною у сферах телекомунікацій, радіоастрономії, системах безпеки та наукових дослідженнях. Проте зростання обсягів генерованих даних створює виклики у сфері їхнього ефективного зберігання та подальшого управління.

Одним із ключових завдань є організація надійного зберігання прийнятих сигналів. З цією метою застосовуються файлові сховища або бази даних, які мають забезпечувати швидкий доступ до великих масивів інформації, а також їх подальшу обробку. Розробка ефективних підходів до зберігання даних SDR є важливою умовою повноцінного використання цієї технології.

Ефективна система зберігання й обробки даних, отриманих з SDR-приймачів, має вирішальне значення для реалізації безперервного моніторингу та аналізу радіочастотного спектра. Вона дозволяє вчасно виявляти порушення, проводити глибокий аналіз і приймати обґрунтовані рішення на основі зібраної інформації. Крім того, якісне управління сигналами відкриває нові перспективи у наукових дослідженнях, розвитку штучного інтелекту та систем машинного навчання, а також підвищує ефективність сучасних засобів зв'язку та безпеки.

Отже, проблема зберігання даних, отриманих з SDR-приймачів, набуває все більшої актуальності через необхідність забезпечення надійного, масштабованого та швидкого доступу до великих обсягів інформації, яку генерують сучасні програмно-визначувані системи.

2 ОГЛЯД ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ ТА ЗБЕРІГАННЯ СИГНАЛІВ SDR

2.1 Основні функції та особливості GNU Radio

GNU Radio є потужною платформою, розробленою для проєктування, моделювання та реалізації високоефективних радіосистем. Цей фреймворк побудований на принципі потокової обробки даних (flowgraph), де користувачі можуть зручно комбінувати окремі функціональні блоки для здійснення складних операцій із цифровими сигналами[5].

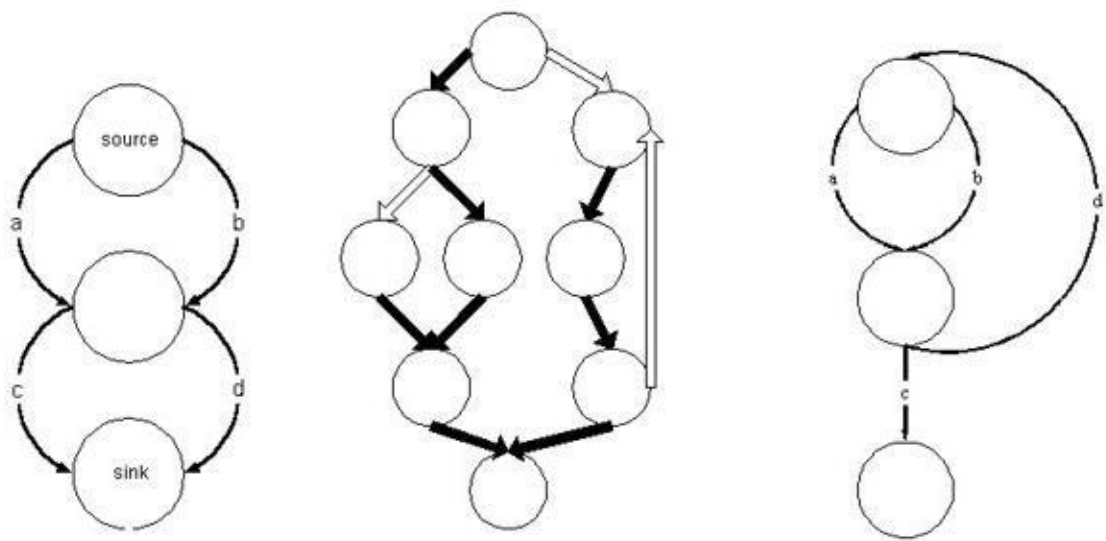


Рисунок 2.1 а – базова схема потокового графу, б – граф із позначенням напрямків потоків між блоками, в – спрощена схема з доданим зворотним зв'язком у вигляді зациклення.

1. Гнучка модульна архітектура.

GNU Radio побудований на основі великого набору блоків, які можна вільно комбінувати для створення різноманітних радіосистем. Така структура забезпечує чудову масштабованість і дозволяє реалізовувати як прості, так і складні проєкти.

2. Універсальність застосування.

Цей інструмент підходить для різних напрямків, серед яких:

- обробка звукових сигналів,

- системи мобільного зв'язку,
- супутниковий моніторинг,
- радарні технології,
- GSM-мережі,
- цифрове радіо (DRM). Всі ці задачі реалізуються без залучення спеціалізованого апаратного забезпечення.

3. Зручність у використанні.

GNU Radio включає велику кількість готових алгоритмів і типових блоків, що спрощує розробку нових систем. Бібліотека прикладів дозволяє швидко освоїтись навіть новачкам.

4. Сумісність із різним обладнанням

Фреймворк не прив'язаний до жодного конкретного типу пристрою. Він дозволяє створювати системи для широкого спектру стандартів, таких як Wi-Fi (802.11), LTE та інші.

5. Продуктивність і ефективність.

Програма оптимізована для використання на звичайних комп'ютерах, завдяки чому забезпечується висока швидкодія при обробці сигналів.

На рисунку зображено інтерфейс користувача програми – приймача Cqrx, який є частиною GNU Radio.

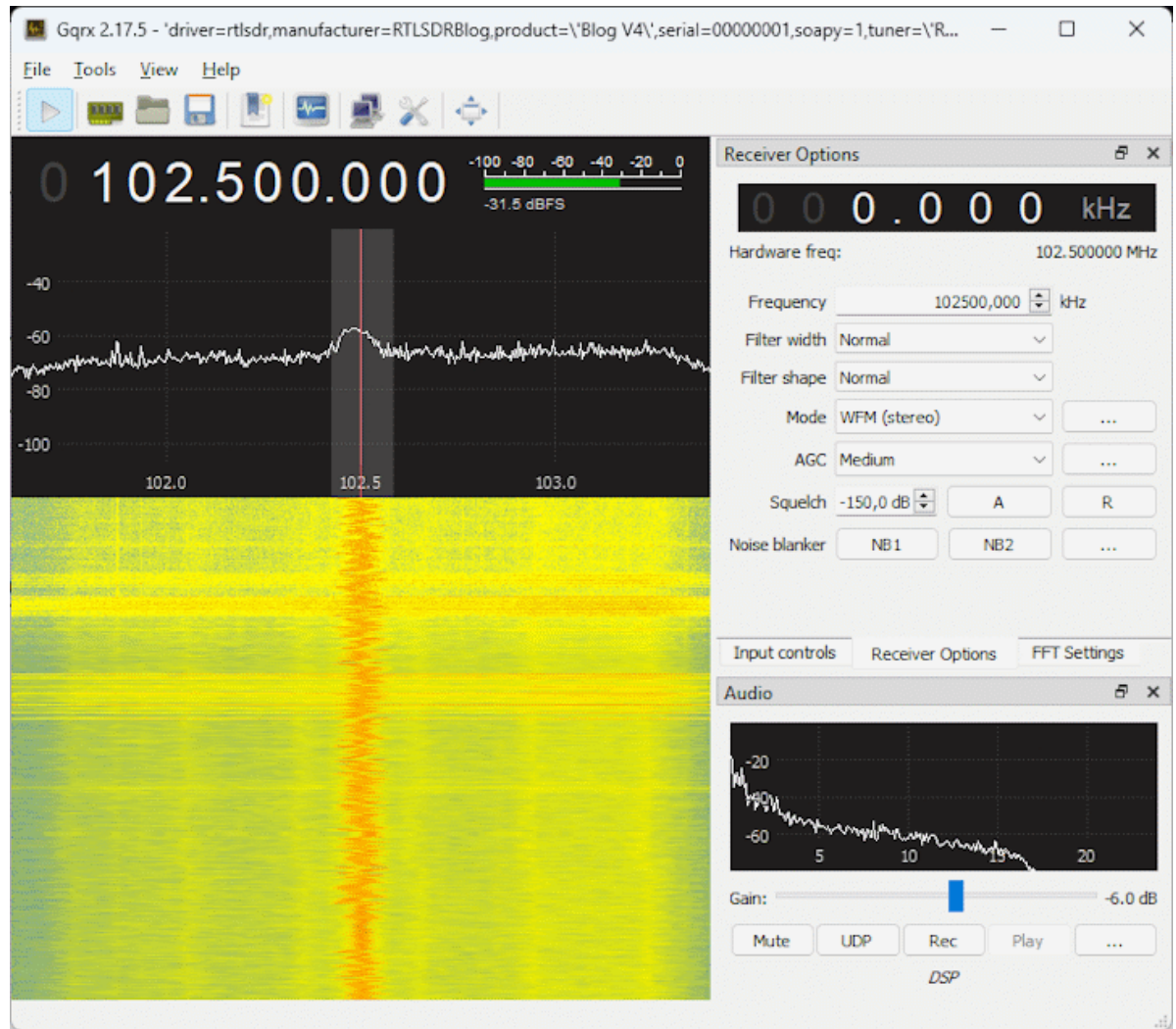


Рисунок 2.1 –Вигляд основного вікна програми-приймача Sqrх.

До складу пакету GNU Radio також входить утиліта GNU Radio Companion. Це інструмент з візуальним інтерфейсом, призначений для роботи з SDR-системами. У ньому можна моделювати функціонування програмного радіо, використовуючи набір функціональних блоків. Користувач має змогу компонувати такі елементи, як фільтри, кодеки каналів, модулі синхронізації, демодулятори, еквалайзери, декодери та інші складові, необхідні для побудови повноцінної радіосистеми[6]. На рисунку 2.2 зображено інтерфейс користувача GNU Radio Companion, який є частиною GNU Radio.

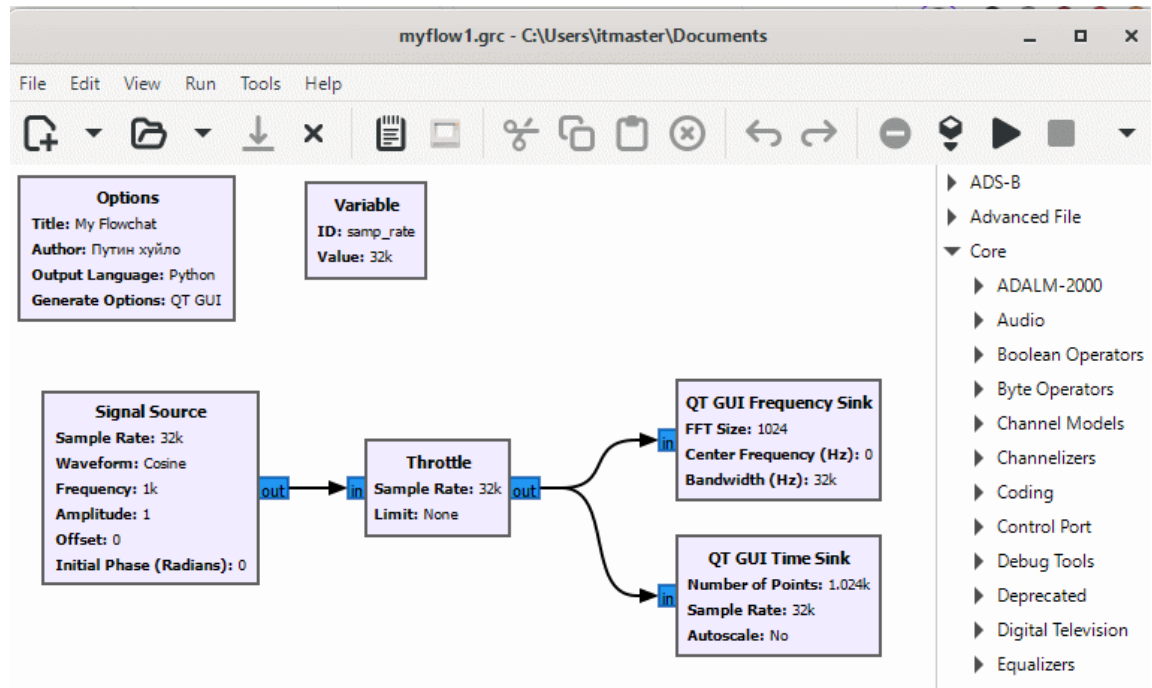


Рисунок 2.2 –Вигляд основного вікна утиліти GNU Radio Companion

2.2 Основні функції та особливості SDRSharp

SDRSharp (SDR) – це популярна програма для прийому та обробки сигналів за допомогою SDR-приймачів. Вона підтримує широкий спектр пристроїв, серед яких RTL-SDR, Airspy, SDRplay, HackRF, BladeRF і LimeSDR. Програма вирізняється зручним інтерфейсом із візуалізацією спектра та водоспаду, гнучкими налаштуваннями частоти, смуги пропускання та модуляцій (AM, FM, SSB, CW тощо), а також здатністю до обробки сигналів у режимі реального часу з мінімальною затримкою.

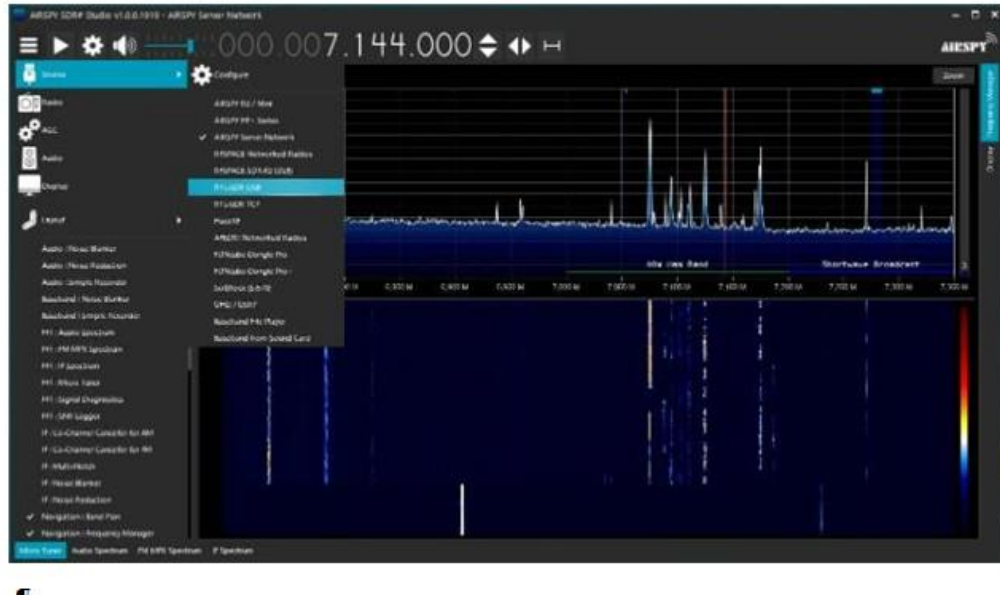


Рисунок 2.3 – Вигляд головного вікна програми SDRSharp

Бібліотеки мовою Python для роботи з SDR

Існує кілька популярних бібліотек Python, призначених для роботи з програмно визначеними радіосистемами (SDR). Вони забезпечують зручні інструменти для прийому, обробки та аналізу радіосигналів і використовуються як у навчальних, так і в професійних проектах.

Нижче наведено огляд двох найбільш поширених бібліотек — PySDR та SoapySDR.

1) PySDR

PySDR — це сучасна Python-бібліотека, яка розроблена для полегшення роботи з SDR. Вона пропонує простий і зручний інтерфейс для підключення до SDR-пристроїв та обробки радіосигналів.

Ключові особливості:

- Простий та інтуїтивно зрозумілий синтаксис, що робить її доступною навіть для новачків.
- Підтримка широкого спектра пристроїв, таких як RTL-SDR, HackRF, BladeRF тощо.

- Можливість інтеграції з потужними науковими бібліотеками Python, такими як NumPy, SciPy та іншими, що дозволяє здійснювати складну математичну обробку сигналів.

2) SoapySDR

SoapySDR — це гнучкий API для взаємодії з різними SDR-пристроями. Завдяки уніфікованому інтерфейсу, ця бібліотека забезпечує зручність у розробці програм незалежно від конкретної моделі SDR.

Переваги SoapySDR:

- Універсальний підхід до взаємодії з пристроями різних виробників.
- Підтримка декількох платформ та мов програмування.
- Можливість створення кросплатформених рішень для збору та обробки сигналів.

Основні особливості SoapySDR:

- На відміну від PySDR, бібліотека SoapySDR підтримує широкий спектр SDR-пристроїв за допомогою драйверів (модулів), що дозволяє легко працювати з різноманітним обладнанням.
- Вона надає уніфікований інтерфейс (API) для керування та налаштування SDR-пристроїв, спрощуючи реалізацію обробки сигналів.

Втім, слід враховувати, що використання SoapySDR вимагає ґрунтовних знань у сфері програмування. До того ж, ні вона, ні PySDR не забезпечують можливості зручного збереження та організації великих обсягів сигналів, необхідних для цього проєкту.

.

З ВИКОРИСТАННЯ SDR РАДІО ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ТА ЛЧМ СИГНАЛІВ

3.1 Основні характеристики та сфери використання імпульсних та ЛЧМ сигналів

Сучасні системи зв'язку активно використовують різноманітні методи модуляції для ефективної передачі інформації на значні відстані. Однією з таких є лінійно-частотна модуляція (ЛЧМ), яка є різновидом частотної модуляції. ЛЧМ має широке застосування в радіолокації, зв'язку та радіонавігації завдяки своїй здатності забезпечувати високу роздільну здатність і стійкість до перешкод. Розглянемо фізичні принципи, математичні основи, переваги, недоліки та сфери застосування ЛЧМ.

На практиці використовуються радіоімпульси (рис.3.1), частота яких змінюється за лінійним законом

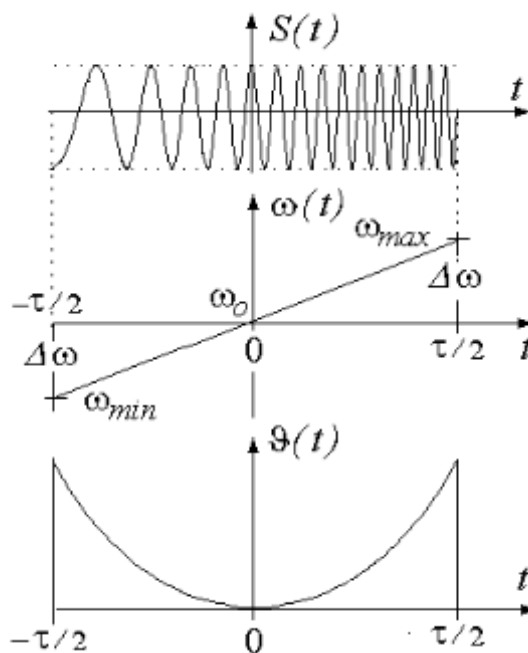


Рисунок 3.1 – Вигляд лінійно-частотно модульованого сигналу

Лінійно-частотна модуляція полягає в тому, що частота несучого сигналу змінюється лінійно з часом у межах заданого діапазону. Тобто, на відміну від звичайної частотної модуляції, де зміна частоти залежить від

миттєвого значення інформаційного сигналу, у ЛЧМ ця зміна є лінійною функцією часу:

$$\omega(t) = \omega_0 + \alpha t$$

де $\alpha = \frac{2\Delta\omega}{\tau}$, $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ девіація частоти, τ – тривалість імпульсу, Частоти змінюється в межах від $\omega_{min} = \omega_0 - \Delta\omega$ до $\omega_{max} = \omega_0 + \Delta\omega$. Фаза сигналу модуляції

$$\vartheta(t) = \int \alpha t dt = \frac{1}{2} \alpha t^2, \quad |t| \leq \frac{\tau}{2}.$$

Період коливань середньої частоти $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 1/f_0$. Число періодів T_0 на довжині τ дорівнює $N_0 = \tau/T_0$. Глибина модуляції частоти $m = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \Delta f/f_0$.

Основним параметром ЛЧМ-сигналу є його база B , на девіацію τ рівна добутку ЛЧМ-сигнал тривалістю Δf^3 :

$$B = \Delta f \tau = N_0 n$$

Спектр керування (рис. 3.2) достатньо складний. Він виражається через спеціальні функції – інтеграли Френеля. Завдяки тому, що згідно з (48) фазою $\omega(t)$ тут функція парна, всі складові спектру мають парний розподіл щодо частоти ω фазою (табл.1, варіант 1.2).

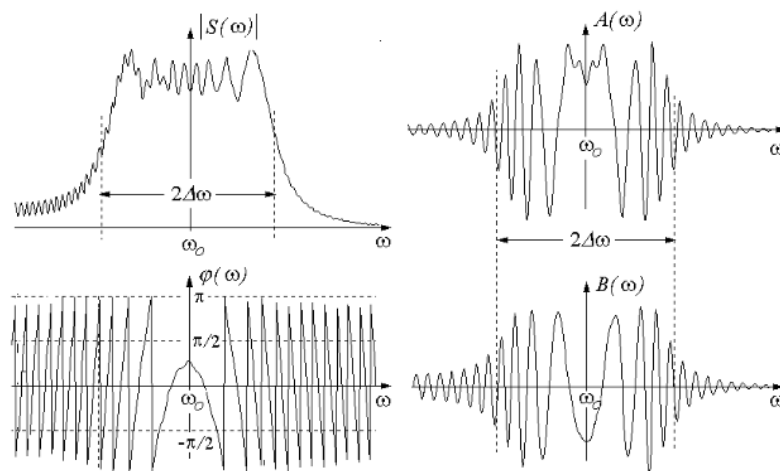


Рисунок 3.2 - Спектр ЛЧМ-сигналу з базою $B = 15$ и $\phi_0 = 0$

Модуль $S(B)$ за формою схожий на трапецію, ширина якої по половинній висоті дорівнює $2\Delta t$, а схили тим крутіші, чим більша база.

$$\phi(\omega) \approx \frac{\pi}{4} - \frac{B}{2} \left\langle \frac{\omega - \omega_0}{\Delta\omega} \right\rangle^2$$

ЛЧМ-сигнали широко використовуються в системах оптимального прийому дальньої радіолокації, і у зв'язку з цим важливу роль відіграє їх автокореляційна функція, що обгинає за формою близька до функції (рис. 3.3), з шириною пелюсток

$$\Delta t \approx \frac{1}{2\Delta f} = \frac{\tau}{2B}$$

У межах центральної пелюстки шириною $2\Delta t$ укладається N періодів T_0 коливань несучої частоти:

$$N = \frac{2\Delta t}{T_0} \approx \frac{\tau/T_0}{B} = \frac{N_0}{B} = \frac{1}{m}$$

При $B \gg 1$ центральна пелюстка має вигляд вузького кореляційного піку. Ставлення називається коефіцієнтом стискування.

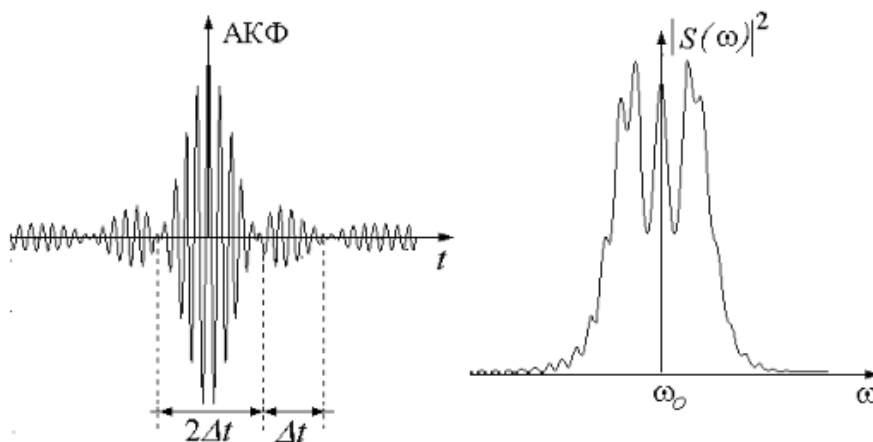


Рисунок 3.3 - Автокореляційна функція ЛЧМ-сигналу (а) та її спектр (б)

при $N_0 = 40, m = 5$ ім = 1/8

Переваги ЛЧМ:

- Висока роздільна здатність: завдяки широкій смузі сигналу.
- Стійкість до шумів та перешкод: широка спектральна смуга ускладнює подавлення сигналу.
- Можливість використання компресії імпульсу: дозволяє отримати вузький за тривалістю імпульс при збереженні енергії довгого імпульсу.
- Простота генерації: за допомогою сучасних цифрових синтезаторів.

Недоліки ЛЧМ:

- Складність обробки сигналу: потребує складного цифрового фільтрування та використання кореляційних методів.
- Паразитні ефекти: такі як побічні сигнали, які можуть впливати на якість прийому.
- Вимоги до точності синхронізації: при розгортці частоти.

Застосування:

- Радіолокація: для точного визначення дальності та швидкості об'єктів.
- Радіонавігація: в авіації та морських системах.
- Сучасні системи зв'язку: наприклад, у стільникових мережах та супутниковому зв'язку.
- Системи електронної боротьби: для створення завад і перехоплення сигналів.

3.2 Використання ЛЧМ у галузі телекомунікацій та радіoeлектроніки

Сучасний етап розвитку радіотехніки характеризується підвищеним інтересом до лінійно-частотно модульованих сигналів із внутрішньо-імпульсною фазовою маніпуляцією (ЛЧМ-ФМ). Застосування таких сигналів

істотно розширює функціональні можливості радіосистем різного спрямування та забезпечує підвищення ефективності їх роботи.

Під час проєктування сучасних цифрових багатоканальних систем зв'язку широке застосування отримало кодове розділення каналів. Основні вимоги до сигналів у таких системах включають високу стійкість до частотної неузгодженості, викликаній ефектом Доплера, а також наявність великого ансамблю слабо корельованих сигнально-кодових форм.

Щоб задовольнити ці умови, зазвичай використовують сигнали з фазовою модуляцією гармонійного носія, керованою псевдовипадковою послідовністю (ФМ ПВП). Такі сигнали демонструють добрі кореляційні властивості та підходять для практичного використання завдяки своїй варіативності.

Однак їхнім недоліком є вразливість до доплерівських зсувів частоти, що порушує узгодження параметрів сигналу з приймальною схемою. Це призводить до ускладнення процесу синхронізації, збільшення часу пошуку сигналу та необхідності впровадження складних систем стеження за частотою.

На відміну від цього, ЛЧМ-сигнали мають властивість інваріантності до частотних зсувів, що значно підвищує їхню надійність в умовах змінної швидкості передавача чи приймача. Сьогодні доступна генерація ЛЧМ-сигналів з прямокутною, колокоподібною або косинусоїдальною обвідними. Прямокутна форма простіша для реалізації, а косинусоїдальна забезпечує кращу стійкість до доплерівських зсувів.

ЛЧМ-сигнали демонструють вигідні функції невизначеності, що робить їх корисними в радіолокації. Проте їх обмежений набір слабо корельованих форм обмежує можливість використання в багатоканальних системах зв'язку з великою кількістю користувачів.

Це зумовлює актуальність покращення кореляційних характеристик таких сигналів, зокрема через фазову модуляцію ЛЧМ-імпульсів за ПВП. Ідея об'єднання властивостей ФМ ПВП та ЛЧМ-сигналів (ЛЧМ-ФМ) є перспективною. Подібні сигнали вже використовувалися в радіолокації —

зокрема, завдяки здатності одночасно розрізняти об'єкти за відстанню та швидкістю краще, ніж стандартні ЛЧМ.

Зі збільшенням довжини ПВП такі сигнали набувають шумоподібного спектру, а їхня смуга частот значно розширюється, що відкриває додаткові можливості для систем зв'язку. Такі сигнали могли б не лише гарантувати інваріантність до доплерівського зсуву частоти, а й значно підвищити рівень скритності їх функціонування. Завдяки своїй шумоподібній структурі та широкій смузі займаних частот, ЛЧМ-ФМ сигнали ускладнюють їхнє виявлення засобами радіорозвідки. Це робить їх привабливими для застосування в інформаційно захищених і військових комунікаційних системах.

3.3 Виявлення імпульсних фазово-кодованих та ЛЧМ радіолокаційних сигналів

Перше що потрібно робити для виявлення радіолокаційних та інших радіосигналів апаратури радіорозвідки та раадіоборотьби це перехопити та проаналізувати радіолокаційні сигнали. Цікаві форми хвиль — це лінійна частотна модуляція (ЛЧМ), фазово-кодована (ФК) та багатоносійна (МК) форми хвиль. Проблема полягає у виконанні детектування з вимогою реального часу та можливістю інтегрування за найдовшою шириною імпульсу (ЛЧМ). У підрозділі розглянуто можливість використання функцію неоднозначності як квадратичний частотний детектор, який здатний допомогти розпізнавати форми хвиль серед аналізованого набору форм хвиль. Його характеристики детектування переоцінено, і запропоновано деякі оцінювачі для полегшення етапу внутрішньоімпульсної оцінки.

Контекстом дослідження у даному розділі є вимірювання електронної підтримки (ESM), що застосовується до радіолокаційного сигналу. Це полягає у перехопленні електромагнітного випромінювання та визначенні природи перехопленого сигналу для ідентифікації радіолокатора-випромінювача [4].

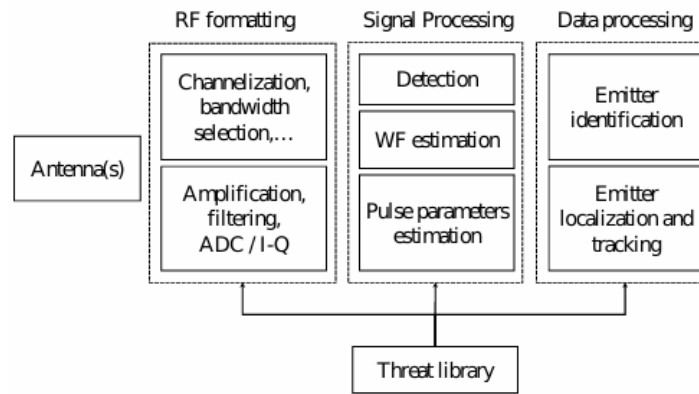


Рисунок 3.4 - Загальні функції архітектури системи ESM

Загальні функції системи ESM представлені на рис. 3.4. Ми розглядаємо функцію обробки сигналів та, зокрема, функцію детектування. Детектор має ініціювати наступні кроки, зокрема розпізнавання форми хвилі (WF) що цікавить, та оцінка внутрішньоімпульсної активності. Для їх вирішення вибираються детектори часчастоти (TF). Короткочасне FT або синхронне стискання на основі Фур'є (FSST) [5] виявляють великий інтерес до розпізнавання форми хвилі LPI-радаром, зокрема з використанням CNN [3]. Однак, детектування має бути виконано, або інтегрування за часом (вибірki) цих детекторів TF обмежується квазістаціонарним WF, змушуючи інтегрувати на частку тривалості імпульсу. З іншого боку, оптимальне формулювання детектора частоти запропонована в [6], використовуючи перехресний розподіл Вігнера-Вілле (WVD). Функція неоднозначності (AF) пов'язана з WVD, але зберігає причинно-наслідкову властивість [7]. У наступних підрозділах ми покажемо, що AF виконує концентрацію енергії LFM, PC та MCWF на відміну від WVD. У наступному підрозділі будуть представлені характеристики детектування AF. Набір WF $\mathcal{W} = \{1: LFM, 2: PC, 3: MC\}$ містить елементарний LPI-радар WF, з якого можна розробити складніший радар WF [6]–[8]. Загальні вирази такі, для всіх $k \in [1, N]$:

$$x_1[k] = A e^{i2\pi f_0 \frac{k}{f_s}} e^{i\phi_0} e^{i\pi \alpha \frac{k^2}{f_s^2}} \quad (3.1)$$

$$x_2[k] = A e^{i2\pi f_0 \frac{k}{f_s}} e^{i\phi_0} \sum_{p=0}^{N_m-1} \text{rect}\left(\frac{k-pN_{sm}}{N_{sm}}\right) e^{i\phi[k]} \quad (3.2)$$

$$x_3[k] = \frac{A}{\sqrt{N_f}} e^{i2\pi f_0 \frac{k}{f_s}} \sum_{p=1}^{N_f} e^{i2\pi f_p \frac{k}{f_s}} e^{i\phi_p} \quad (3.3)$$

де A — амплітуда, f_0 — несуча частота, f_s — частота дискретизації, ϕ_0 — початкова фаза. LFM: α — нахил ЧРП-сигналу. РС: N_m — кількість моментів сигналів РС, N_{sm} — кількість моментів дискретизації, Φ — вектор розміром $1 \times N_m$, що містить фазові коди. МС: N_f — номер Без піднесучих, частота швидкості $f_p = \left(p - \frac{N_f}{2}\right) \delta f$ та фаза ϕ_p характеризують p^{th} піднесучу.

Вираз РС включає всі РС WF. Вирази LFM та МС є найпростішими виразами їхнього власного набору.

3.4 Властивості функції належності виявлених сигналів

Розглянемо кількість спостережуваних зразків N як сім.

$N_I = N - n_\tau$ визначає кількість інтегрованих зразків,. Детектор, що базується на A , такий:

$$D_{\mathcal{W}}(n_\tau, f) = \sum_{k=0}^{N_I-1} x_{\mathcal{W}}[k + n_\tau] \times x_{\mathcal{W}}^*[k] e^{-i2\pi f \frac{k}{f_s}} \quad (3.4)$$

Вартість розрахунку AF, реалізованої за допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є, становить $O(N_I^2 \text{ у } N_I)$. Результати застосування детектора на $\mathcal{W}$ представлені в таблиці 3.1. Вся енергія LFM.

Таблиця 3.1 – Модулі частотного детектора для поширених видів модуляції

W	f_m	$D_W(n_\tau, f_m)$
LFM	$n_\tau \frac{\alpha}{f_s}$	$N_I A^2$
PC	0	$A^2 N - N_m n_t + n_t \sum_{k=0}^{N_m-2} e^{i(\varphi_{k+1} - \varphi_k)} $
MC	0	$\frac{N_I}{N_f} A^2 \left \frac{\sin\left(\frac{\delta f}{f_s} \pi N_f n_\tau\right)}{\sin\left(\frac{\delta f}{f_s} \pi n_\tau\right)} \right $

Сигнал сконцентрований в одночастотному каналі. Він залишається істинним для PC, якщо $n_\tau \ll N_I$. Для MC він періодично істинний. Більше пояснень почнуться в наступному підрозділі. Моделювання для LFM та PC WF представлено на рисунку 3.5. Шум має бути комплексною кругово-симетричною гаусовою (CCSG) випадковою величиною $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$. Ми припускаємо, що час інтегрування менший за ширину імпульсу (PW). Поріг додається для ілюстрації характеристик.

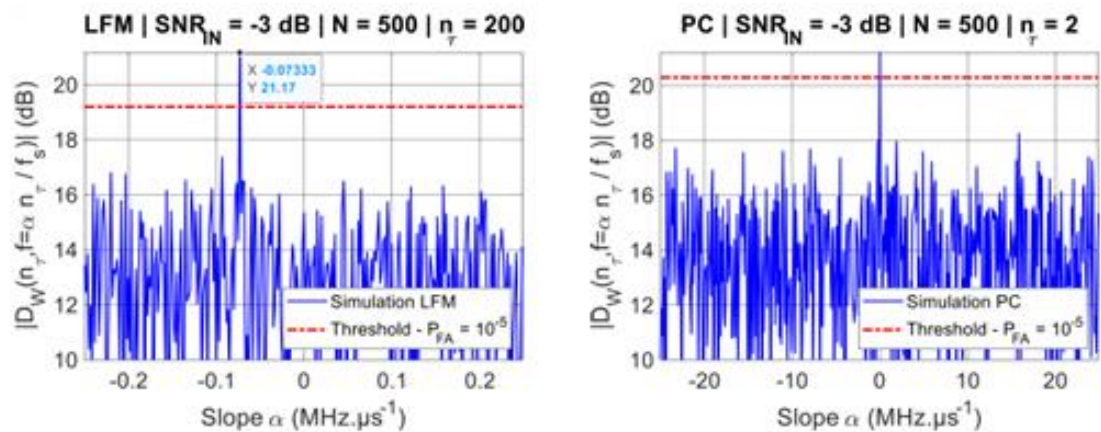


Рисунок 3.5 – Вихід амплітудно-частотного детектора з певним рівнем шуму

Оцінка $\hat{\alpha}$ визначається як $\hat{\alpha} = \frac{f_s}{n_\tau} \max |D_W(n_\tau, f)|$.

Отже, все WF з $\alpha \neq 0$ безпосередньо розпізнається на виході детектора. Чим більше n_t , тим більша роздільна здатність і точність.

Розділення форм хвиль РС та МС

Виявлення МС WF потребує кількох розрахунків АЧ для різних n_t . Моделювання для випадку $f_m=0$ на рисунку 3. Вихідний сигнал детектора періодично перевищує поріг виявлення МС WF. Збільшення для РС погіршує характеристики детектора.

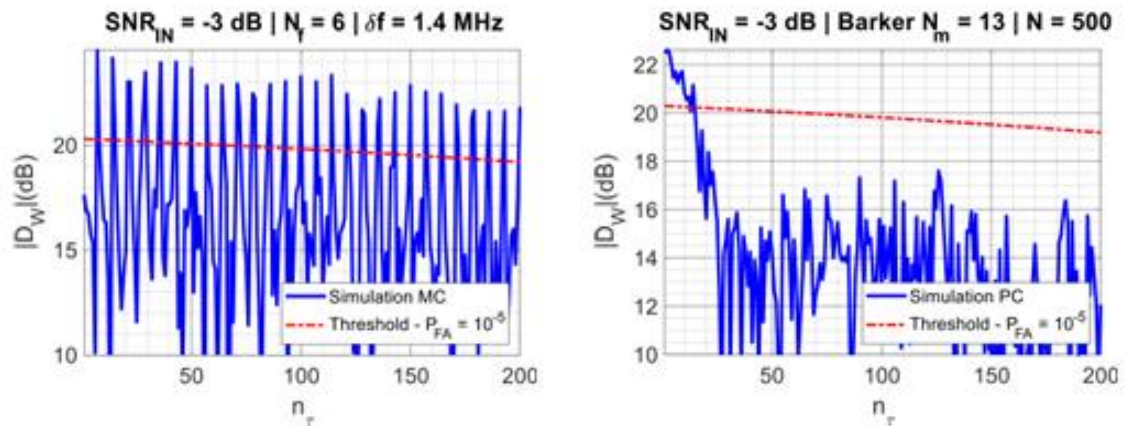


Рисунок 3.6 – Вихід амплітудно-частотного детектора з певним рівнем шуму та МС сигнал – N=500

Простий критерій для розділення WF на основі частотної гнучкості та РС полягають у перевірці того, чи відбуваються виявлення, чи ні, коли n_t збільшується. Основним недоліком детектора є необхідність обчислювати різні фактори, що суперечать розпізнаванню ЛЧМ. Для запропонованого моделювання необхідно виконати близько 1,55 мільйона операцій для розрахунку детектора для одного. Однак, завдяки причинно-наслідковій властивості АЧ, можливо виконати розрахунок одразу після надходження вибірки в канал приймача. Можна показати, що для ПЛІС з тактовою частотою 100 МГц можна обчислити кілька десятків АЧ паралельно в реальному часі для $f_s=50$ МГц та N=500.

Поза $f_m=0$, МС WF має симетричні артефакти, які можна виявити через перешкоди між піднесучими. Якщо $p \neq p'$ з $(p, p') \in [1, N_f]^2$, тоді:

$$|D_W(n_\tau, (p - \acute{p})\delta f)| = \frac{N_I}{N_f} A^2 \quad (3.5)$$

Симетрична властивість дозволяє відрізнити їх від потенційних сигналів LFM.

Оцінка частоти несучої та піднесучої

Детектор D_W є комплексним. Аналітичні розрахунки для W показують, що аргументи детектора дозволяють оцінити частоту (див. таблицю 3.2).

Таблиця 3.2 – Аргументи для детектора W

W	f_m	$D_W(n_\tau, f_m)$
LFM	$n_\tau \frac{\alpha}{f_s}$	$2\pi(f_0 + \frac{N}{2} \frac{\alpha}{f_s}) \frac{n_\tau}{f_s}$
PC	0	$2\pi f_0 + \frac{n_\tau}{f_s}$
MC	0	$2\pi(\frac{\delta f}{2}(N_f - 1) + f_0) \frac{n_\tau}{f_s}$

Зауважимо, що одного виміру D_W для унікального недостатньо для розгортання фази n_τ без неоднозначності. Щоб оцінити частоту, детектор D_W необхідно повторити кілька разів. Можна запропонувати FT з змінною n_τ інтегрування. Ми визначаємо множину S_{12} , в якій $|D_W(n_\tau, f_m)|$ для кожного n_τ перевищує поріг виявлення поріг. Оцінка несучої частоти для сигналів LFM та PC така:

$$\hat{f}_0 = \max \left(\text{FT} \left(\frac{D_W(n_\tau, f_m) \in S_{12}}{|D_W(n_\tau, f_m)| \in S_{12}} \right) (\eta) \right) - \frac{N\hat{\alpha}}{2f_s} \quad (3.6)$$

Для MC WF оцінка δf може бути виконана двома методами. Перший полягає у використанні симетричних артефактів, що спостерігаються в рівнянні (3.5), але це можливо лише тоді, коли їх можна виявити. Другий метод використовує лише виявлення на $f_m = 0$ завдяки періодичним максимумам детектора як функції n_τ . При періодичному виявленні може бути виконано

кілька виявлень (1, 2 або 3). Максимум кожного періодичного виявлення збирається в наборі під назвою S_3 .

$$\widehat{\delta f} = \max(\text{FT}\{|D_{\mathcal{W}}(n_{\tau}, 0)| \in S_3\})(\eta) \quad (3.7)$$

Оцінка N_f виконується за допомогою кількох гіпотез N_f . Остаточне швидке перетворення Фур'є дає оцінку f_0 .

$$\widehat{f}_0 = \max(\text{FT}\{D_{\mathcal{W}}(n_{\tau}, 0) \in S_3\})(\eta) - \frac{\widehat{\delta f}}{2}(\widehat{N}_f - 1) \quad (3.8)$$

Оцінка параметрів МС вимагає кількох періодичних вимірювань. На відміну від оцінки LFM (частоти несучої LFM) та РС (частоти несучої РС), яку можна було б виконати за допомогою 10 розрахунків АФ (активної частоти), потрібно від 30 до 40 розрахунків АФ.

Інтегрування за більшої тривалості

Для оцінки впливу збільшення тривалості для приймачів ESM корисним є розрахунок відношення сигнал/шум (SNR), оскільки наступні кроки потребуватимуть мінімального SNR для роботи. Припускаючи, що час інтегрування дорівнює ширині імпульсу та центрований на ній, SNR на виході детектора дорівнює:

$$SNR_{out} = \frac{N_I SNR_{in}^2}{2SNR_{in} + 1} \quad (3.9)$$

де $SNR_{in} = \frac{A^2}{\sigma^2}$ Враховуючи, що інтеграція перевершує РВ з $N_{I, \text{signal}} < N_I$

ми отримаємо

$$SNR_{out} = \frac{N_{I, \text{signal}}^2 SNR_{in}^2}{N_I + 2N_{I, \text{signal}} SNR_{in}} \quad (3.10)$$

$$N_{I, \text{signal}} = \left\lfloor \frac{N_I}{N_{PW, \text{sample}} \cdot r_{dc}} \right\rfloor$$

де r_{dc} — шпаруватість, а $N_{PW,sample}$ — кількість вибірок, що складають ширину імпульсу сигналу, що нас цікавить. Формула проілюстрована на рисунку 3.7.

Кожна лінія розриву характеризує початок або кінець імпульсу. У цьому прикладі, щоб отримати співвідношення сигнал/шум SNR_{out} понад 17 дБ, яке буде досягнуто, якщо час інтегрування дорівнює ширині імпульсу $N_{PW,sample}$ та синхронізується з нею, нам потрібно збільшити кількість інтегрованих вибірок зі $N_I=100$ до приблизно $N_I=10000$ інтегрованих вибірок для шпаруватості $r_{ds} = 0.10$.

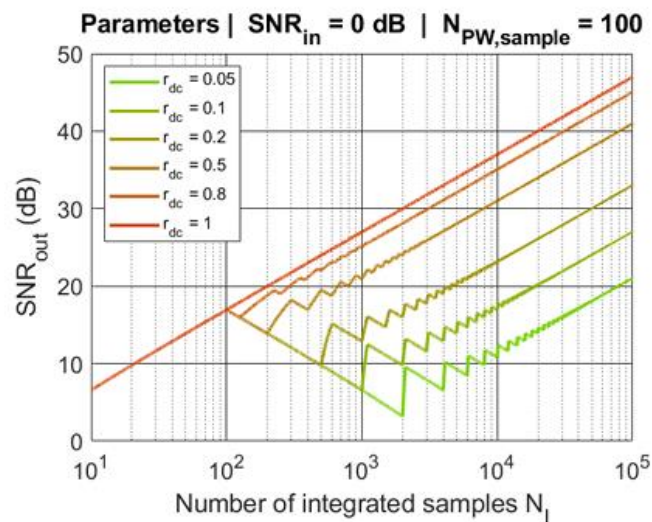


Рисунок 3.7 – Відображення зміни SNR в залежності від кількості відліків

Виявлення кількох сигналів

Збільшення інтегрування за часом означає, що в каналі приймача можуть бути присутні кілька сигналів. Якщо сигнали мають частоту з частотною складовою (LFM), можна легко показати, що вони розділені з будь-якими перешкодами, якщо їхній нахил різний і їх можна розрізнити. Їх несуча частота вимірюється попереднім методом. Сигнали Multi - PS можна було виявити завдяки появі симетричних артефактів, які дозволяють оцінити кількість накладених сигналів в $f_m=0$. Випадок кількох сигналів з наявністю однієї або кількох MC WF можна було вирішити завдяки оцінці δf . Це вимагає

додаткових розрахунків з різними гіпотезами (симетричні артефакти форм РС, одна МС, кілька МС).

Синтез детектора

Детектор на основі АФ здатний виявляти W WF. Два розрахунки АФ для $\pi_\tau \rightarrow 1$ та $\pi_\tau \in \left[\frac{N}{4}, \frac{N}{2}\right]$ забезпечують виявлення РС та LFM, а також розпізнавання LFM з достатньою точністю та роздільною здатністю при спільній оцінці нахилу. Щоб мати змогу розділити оцінки РС та МС WF несучих та піднесучих частот, АФ-детектор повинен виконуватися на десятках π_τ . Ці розрахунки можна виконувати паралельно. Оцінки базуються на розрахунку FT, який є ефективним оцінювачем для комплексних експонент. Знаючи, що РС WF мають $r_{dc} \sim 0.1$ та відносно короткий PW порівняно з LFM та МС, збільшення часу інтегрування дає переваги для двох останніх WF. Для того, щоб досягти принаймні рівної продуктивності детектування з РС, час інтегрування має бути встановлений з найдовшим очікуваним РС PW та з його мінімальним очікуваним значенням r_{dc} . Багатосигнальне детектування може бути реалізовано в аналогу, який вимагає більше обчислень та дещо усуває вимоги до роботи в реальному часі.

3.5 Ефективність детектування

Проблема виявлення окремого сигналу

Припустимо, що це один зашумлений прийнятий сигнал. Ми припускаємо, що тепловий шум є основним шумом приймача ESM, і що його можна змодельовати за допомогою CCSG-рівняльної частоти $n_k \sim CN(0, \delta^2)$ де $k \in \llbracket 1, N_I \rrbracket$ вважається однаковим та незалежно розподіленим. Сигнал є детермінованим з невідомими параметрами. За всіх цих припущень, проблема виявлення полягає у виборі між:

$$\begin{aligned} H_0: y[k] &= n[k] \\ H_1: y[k] &= x_w[k] + n[k], k \in [1, N_I] \end{aligned} \quad (3.11)$$

Для оцінки ефективності виявлення потрібні вирази ймовірності хибної тривоги PFA та ймовірності виявлення PD.

Вирази та аналіз PFA та PD

Детектор $|D_W|$ застосовується до прийнятого сигналу y .

Завдяки визначенню, представленому в рівнянні (4), ми маємо:

$$d = |D_W(n_\tau, f)| = \left| \sum_{j=0}^{N_I-1} y_1[j] y_2^*[j] \right| \quad (3.12)$$

$$\text{де } y_1[j] = y[j + n_\tau] \text{ і } y_2[j] = y[j] e^{i2\pi f \frac{j}{f_s}}$$

Розрахунок PFA:

а) Точний аналітичний розрахунок: Аналітичні розрахунки можна було б виконати в гіпотезі H_0 , оскільки випадкову величину можна було б розпізнати як граничну ймовірність позадіагональних елементів розподілу Вішарта. ФПВ для гіпотези H_0 така[9]:

$$p_{H_0}(d) = \frac{4d^{N_I}}{\Gamma(N_I)\sigma_d^2} K_{N_I-1} \left(\frac{2d}{\sigma_d^2} \right) \quad (3.13)$$

Потім PFA виводиться з PDF-файлу завдяки програмному забезпеченню Mathematica:

$$P_{FA}(u) = \int_u^{+\infty} p_{H_0}(x) dx = \frac{2u^{N_I}}{\Gamma(N_I)} K_{N_I} \left(\frac{2u}{\sigma_d^2} \right) \quad (3.14)$$

де: K_V – модифікована функція Бесселя другого роду порядку V ;

Γ – гамма-функція;

$$\sigma_d^2 = \frac{N_I}{2\sigma^4}$$

Однак, обчислення вимагає часу для виконання, і для чисел N_I , вищих за кілька сотень, $\Gamma(N_I)$ та K_{N_I} є величезними числами, наприклад:

$$\Gamma(1000) \cong 10^{3428} \quad K_{1000}(0.1) \cong 10^{3865} \quad (3.15)$$

Отже, щоб бути ближчим до застосування в реальному часі, пропонується порівняння між таблицями точного виразу PFA розрахованого за допомогою програмного забезпечення Mathematica, та наближеним, що базується на модулі Центральної Граничної Теорема для d .

Приблизний розподіл CLT:

CLT, застосований до детектора, D_W дає комплексний гауссовий розподіл. Тоді, у випадку H_0 , модуль цього комплексного гауссового розподілу з нульовим середнім значенням $|D_W|$ є добре відомим розподілом Релея:

$$p(d|H_0) = \frac{d}{\sigma_d^2} e^{\frac{-d^2}{2\sigma_d^2}} \quad (3.16)$$

Тоді, PFA є:

$$P_{FA}(u) = e^{-\frac{u^2}{2\sigma_d^2}} \quad (3.17)$$

Ми пропонуємо порівняльне моделювання з точним виразом з наступними характеристиками, коли вони ефективно обчислюються:

$$N_I = [20, 50, 100, 250, 500, 1000, 2000];$$

Щільна амплітуда фактора (PFA), що нас цікавить, яка називається цільовою, $P_{FA,target}$, дорівнює вектору $P_{FA,target} = [10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}]$.

Кількість витягів N_d становить 30 мільйонів.

Така кількість видліків дозволяє мати щонайменше близько 300 вивідліків в області гістограми, що нас цікавить, для найменшої PFA, що нас цікавить, щоб забезпечити більш обґрунтоване наближення функції ймовірності, а потім і функції кумулятивної густини (CDF).

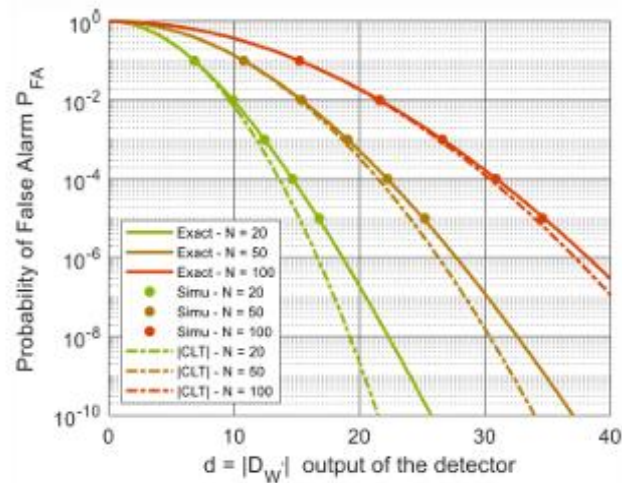


Рисунок 3.8 – Можливість фальшивого спрацювання

Точний вираз потім перевіряється за допомогою моделювання (див. рис. 3.5), і похибка з наближеним виразом є видимою.

CLT можна вважати дійсним наближенням, якщо відносна похибка, допущена для PFA, є прийнятною. Наприклад, якщо ми приймаємо відносну похибку 10%, то для очікуваного PFA 10^{-5} можна інтегрувати на інтервалі $N_I \in [1000, \infty]$ (див. рис. 3.9).

Розрахунок PD:

Для PD пропонується будь-який точний вираз, оскільки необхідна точність ймовірності виявлення не така важлива, як хибна тривога. Дійсно, 0,8, 0,90 або 0,99 можуть бути прийнятними значеннями для ймовірності виявлення. Однак, оскільки ми маємо функціональне моделювання, ми запропонуємо оцінити похибку, внесену модулем CLT, наближеною до PD моделювання.

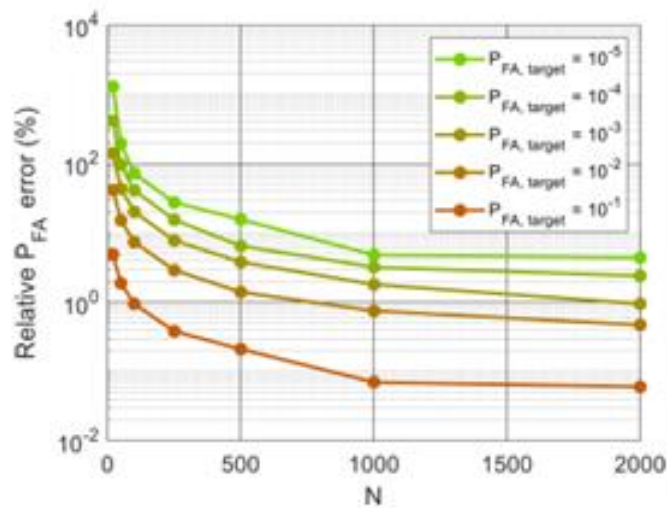


Рисунок 3.9 - Оцінка похибки PFA як функції інтегрованої вибірки N

Модуль комплексного гаусового розподілу з ненульовим середнім значенням є добре відомим розподілом Райса:

$$p(d|H_1) = \frac{d}{\sigma_d^2} e^{-\frac{(d+\mu)^2}{\sigma_d^2}} I_0\left(\frac{\mu d}{\sigma_d^2}\right) \quad (3.18)$$

де $\mu = E(|y_1|) = E(|y_2|)$

Отже, PD дорівнює:

$$P_D(u) = Q_1\left(\frac{\mu}{\sigma_d}; \frac{d}{\sigma_d}\right) \quad (3.19)$$

де Q_1 -функція Маркума.

Використовуючи попередні параметри моделювання, (3.9) задані у властивості 3 та ту саму відносну похибку для ймовірності виявлення цього разу, отримуємо рис. 3.10.

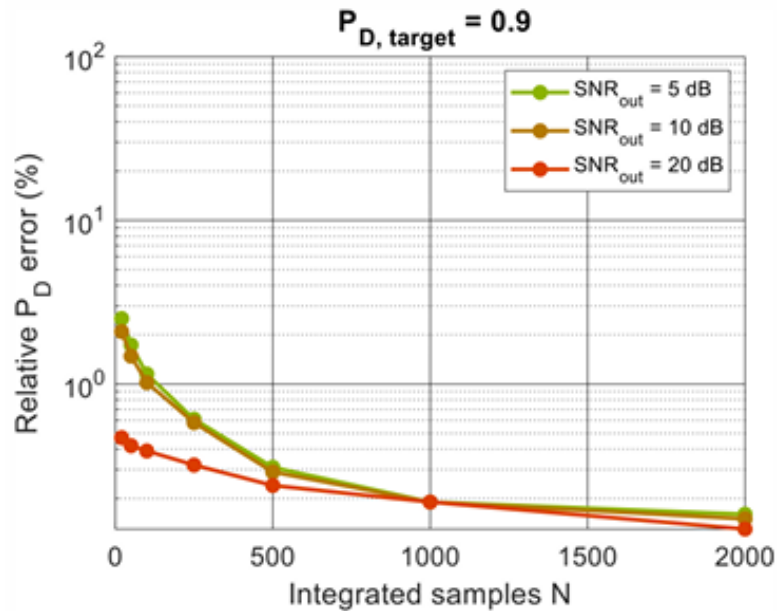


Рисунок 3.10 – Графік, що представляє відносну похибку обчислення ймовірності виявлення як функцію очікуваного співвідношення сигнал/шум на виході

Співвідношення сигнал/шум на вході можна розрахувати за допомогою (9). Відносна похибка ймовірності виявлення залишається меншою за кілька відсотків. Отже, приблизна ймовірність виявлення може бути використана без будь-яких обмежень N_I в контексті ESM.

Характеристика роботи приймача (ROC)

Графік ROC детектора зображено на рис. 3.11 завдяки попереднім розрахункам.

Якщо вимоги обмежені детектором, тоді ROC та рис. 3,11 використовуються для визначення мінімальної кількості інтегрованих вибірок для отримання необхідної максимальної помилкової тривоги з відповідною ймовірністю виявлення.

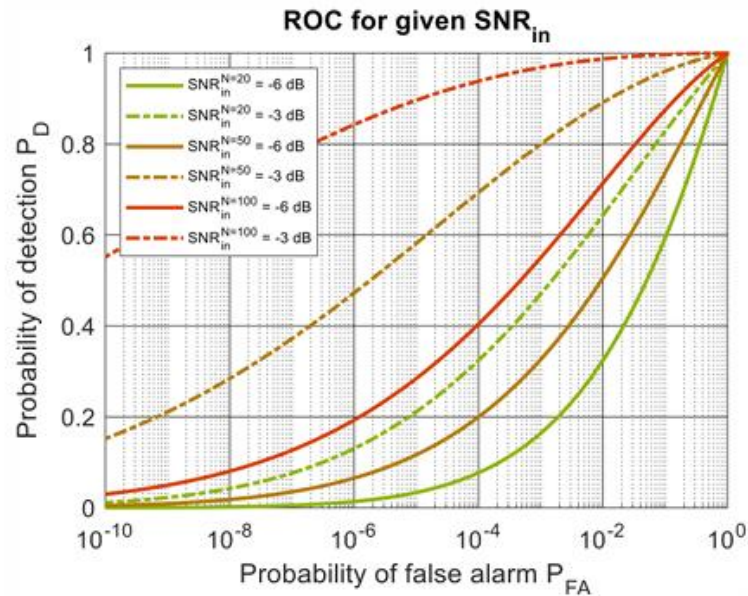


Рисунок 3.11 - ROC $|D_W|$ з вхідним SNR_{in} (суцільна лінія для $SNR_{in} = -6$ дБ та пунктирна лінія для $SNR_{in} = -3$ дБ) та кількістю інтегрованих N як параметри (зображено кольором)

Ця робота виконана в контексті ESM. Функцію неоднозначності було обрано як квадратичний детектор часу-частоти для виконання детектування на формах хвиль LFM, PC та MC. AF обрано завдяки його властивостям, що дозволяють розпізнавання WF. Спільна оцінка параметра нахилу дуже корисна для розпізнавання LFM і може бути виконана за один обчислення. Однак, щоб піти далі, потрібно кілька розрахунків AF. Оцінки несучої та піднесучої частот можна було виконати завдяки аргументу детектора. Обчислення в реальному часі можна було виконати, оскільки розрахунок AF для необхідних затримок можна було виконувати паралельно та під час надходження кожного зразка завдяки причинній властивості AF. AF-детектор дозволяє збільшити інтегрування за часом та збереження його властивостей на аналізованих формах хвиль. У випадку з кількома сигналами AF-детектор здатний розрізняти аналізовані форми хвиль на шкоду обчисленням у реальному часі. Проаналізовано характеристики детектування детектора.

4 ВИКОРИСТАННЯ GNU РАДІО ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПОШУКОВОГО АЛГОРИТМУ ЛЧМ ТА ІМПУЛЬСНИХ СИГНАЛІВ

4.1 Обґрунтування використання GNU Radio для реалізації пеленгатора ЛЧМ та імпульсних сигналів

Радіопеленгатори належать до класу навігаційних пристроїв, основною функцією яких є визначення координат рухомого об'єкта у просторі. Хоча з появою супутникових навігаційних систем застосування пеленгації в традиційній радіонавігації зменшилося, ця технологія зберігає свою актуальність у сферах радіоконтролю та визначення розташування джерел радіовипромінювання. Ефективність процесу пеленгування значною мірою визначається технічними параметрами використовуваного обладнання. Типову схему сучасного радіопеленгатора наведено на рис. 4. 1 [6].

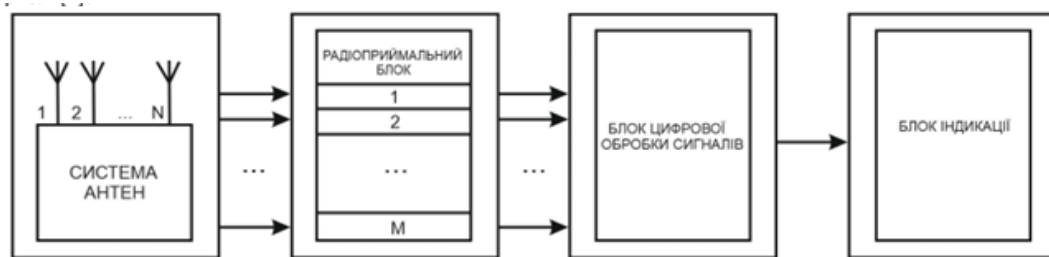


Рисунок 4.1 – Схема радіопеленгатора

На рисунку 4.1 зображено структурну схему радіопеленгатора, яка включає такі основні компоненти: антенний блок, радіоприймальний модуль, блок цифрової обробки сигналів та блок індикації. Крім того, залежно від специфіки застосування, до складу пристрою можуть додатково входити інші функціональні елементи.

Залежно від вимог до системи, до базової структурної схеми радіопеленгатора можуть бути додані додаткові модулі: блок дистанційного управління (через дротові або радіоканали зв'язку), навігаційний блок для

орієнтації пристрою, блок тестування функціональності, а також апаратура для налаштування та калібрування приймальних трактів.

Антенна система пеленгатора включає N антен, які можуть бути розміщені за різними схемами — по колу, еліпсу чи за іншим алгоритмом. Для цього застосовують антени різних типів: спрямовані, рамкові, конічні вібратори, диско-конусні та інші [7, 16, 19].

Радіоприймальний модуль відповідає за фільтрацію, підсилення та перетворення частоти сигналів, що надходять на вхід. Далі сигнали на проміжній частоті передаються на блок цифрової обробки, де здійснюється їхнє аналогово-цифрове перетворення. Метод пеленгування визначає спосіб розрахунку азимуту джерел радіосигналів. Окрім цього, блок цифрової обробки може виконувати спектральний аналіз, вимірювання параметрів сигналів, їх демодуляцію та декодування.

Індикація результатів зазвичай відображається на екрані персонального комп'ютера або ноутбука, який також виконує функції керування обладнанням та зберігання отриманих даних [7].

Сучасні системи виявлення джерел радіовипромінювання використовують кілька типів пеленгаторів: на базі обертових спрямованих антен, квазідоплерівські пристрої, фазові та кореляційні інтерферометри, а також двоканальні автоматичні системи [8].

Кожен тип пеленгатора має свої переваги. Найбільш ефективними для сучасних умов є системи на основі кореляційного інтерферометра, здатні виявляти широкий спектр радіосигналів. Вони можуть обробляти декілька сигналів одночасно в одному частотному діапазоні — як когерентних (від одного джерела), так і некогерентних (від кількох джерел).

Основний принцип функціонування кореляційного інтерферометра полягає у порівнянні виміряних фазових різниць між елементами антенної решітки з теоретично розрахованими фазовими різницями для просторового сигналу, що приходить з певного напрямку. Ці опорні фазові залежності визначаються аналітичним шляхом для всього спектру можливих кутів приходу

сигналу. Напряв, за якого кореляція між прийнятим та розрахованим опорним сигналом досягає максимуму, приймається за напрямок приходу радіохвилі [8].

У практиці виявлення джерел радіовипромінювання найбільш широко застосовується схема з двоканальним прийомом сигналів, яка зображена на рис.4. 2.

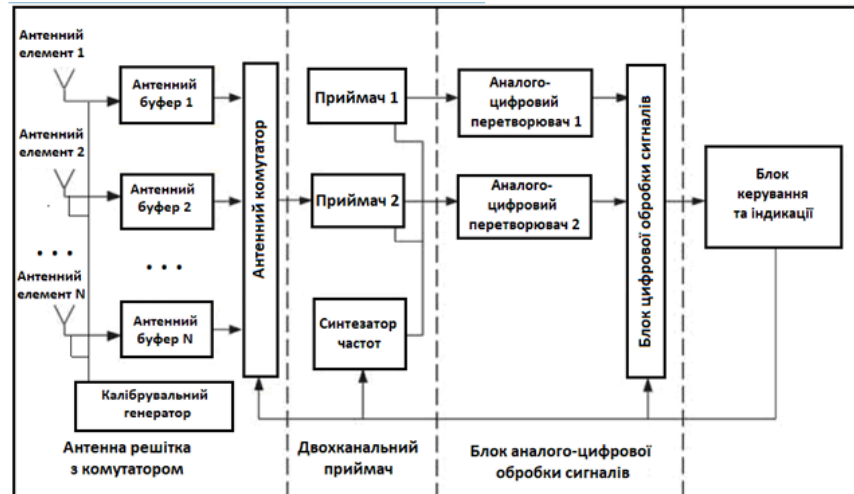


Рисунок 4.2 – Схема кореляційного інтерферометра

У даній конфігурації, коли кількість антен у системі перевищує кількість каналів прийому, антенні елементи по черзі підключаються до приймача за допомогою ВЧ-комутаторів. Основними складовими кореляційного інтерферометра є антена решітка, система комутації антен, двоканальний когерентний приймач, а також блок цифрової та аналогової обробки сигналів.

Антенний комутатор у системі по черзі підключає вибрані пари антенних елементів до входів двоканального приймача згідно з обраним алгоритмом пеленгування. Для забезпечення когерентності прийому на змішувачі обох каналів подається однакова високочастотна напруга, згенерована синтезатором частот. Основні задачі двоканального приймача полягають у перетворенні частоти прийнятого сигналу та первинному фільтруванні за побічними каналами.

Блок аналого-цифрової обробки реалізує обчислення відповідно до заданого алгоритму цифрової обробки сигналів. Пристрій управління та індикації, що входить до складу інтерферометра, забезпечує керування системою і взаємодію з користувачем через інтерфейс.

Робота кореляційного інтерферометра для визначення напрямку на джерело радіовипромінювання здійснюється наступним чином: для кільцевої конфігурації антенної решітки комплексну амплітуду можна представити у вигляді [1, 2]:

$$E_n = E_0 \exp \left[j \left(2\pi \frac{R_n}{\lambda} \cos(\theta_0 - \alpha_n) \sin \beta_0 + \varphi(t) + \varphi_0 \right) \right] \quad (4.1)$$

де $R_n = |\vec{R}_n|$ - радіус кільця з антенами, α_n - кут розташування n-го елемента решітки.

Кут прибуття сигналу визначається проти годинникової стрілки відносно осі X. Сигнали, що випромінюються різними джерелами, сприймаються антенними елементами решітки та подаються на антенний комутатор. Останній направляє сигнали з обраної пари антен до двох входів панорамного приймача. Отримані сигнали перетворюються в приймачі на проміжну частоту.

Панорамний приймач має широку смугу одночасного огляду, яка значно перевищує спектральну ширину сигналу окремого джерела. Це дає змогу приймати та обробляти одночасно велику кількість радіоканалів. Як показано на рис. 4.3, у межах цієї смуги можуть існувати сигнали з різною спектральною шириною, що належать до різних типів радіовипромінювання.

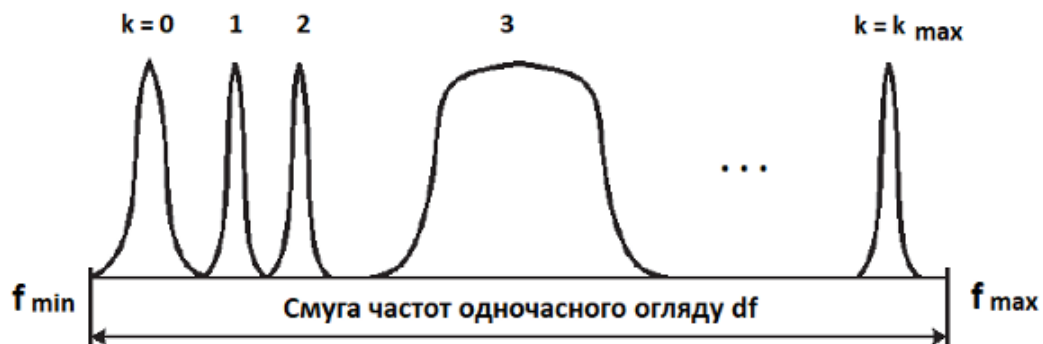


Рисунок 4.3 – Вигляд спектрів сигналів які приймаються панорамним приймачем

Сигнали проміжної частоти з пари виходів приймача подаються на входи аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП), де синхронно

оцифровуються, утворюючи послідовності довжиною N_{Π} відліків. Далі за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) для кожного сигналу обчислюється по комплексних спектральних відліків N_{Π} . З метою оптимізації подальших обчислень зазвичай використовують лише $N_{\Pi}/2$ відліків із кожного спектру. Спектральна компонента в k -му частотному каналі відповідає сигналу від k -го джерела радіовипромінювання [2].

$$E = U/h_d \quad (4.2)$$

де E — це напруженість електромагнітного поля, U — напруга на виході антени, h_d — ефективна (дійсна) довжина вимірювальної антени.

Комплексні амплітуди сигналу в k -му радіоканалі для сигнального тракту $Z_c(n_1, t)$ та опорного тракту $Z_0(n_2, t)$ можуть бути представлені у вигляді:

$$Z_c(n_1, t) = h_d E_0 K \sin \beta_0 \times \exp \left[j \left(2\pi \frac{R_{n1}}{\lambda} \cos(\theta_0 - \alpha_{n1}) \sin \beta_0 + \varphi(t) + \varphi_0 + \varphi \right) \right] \quad (4.3)$$

$$Z_c(n_2, t) = h_d E_0 K \sin \beta_0 \times \exp \left[j \left(2\pi \frac{R_{n2}}{\lambda} \cos(\theta_0 - \alpha_{n2}) \sin \beta_0 + \varphi(t) + \varphi_0 + \varphi \right) \right] \quad (4.4)$$

де h_d — дійсна висота антенного елементу для k -го радіоканалу, яка підключена до входу приймача; E — амплітуда напруженості електромагнітного поля радіосигналу в k -му радіоканалі K, K', φ, φ' коефіцієнти підсилення і фазові затримки сигналу сигнального і опорного трактів приймача відповідно для k -го радіоканалу; $1, 2, n_1, n_2$ — номери елементів антенної решітки, $n_1 \neq n_2$; кути положень елементів α антенної решітки.

В наслідок виконання операції виявлення відомі значення центральних частот радіоканалів f_k в смузі одночасного аналізу df і ширина радіоканалу dF . Апаратною реалізацією визначається смуга аналізу значення номерів радіоканалів $\{k\}$, у межах $1 \leq k \leq k_{\max}$, де $k_{\max} = df/dF$, в яких були виявлені радіосигнали, зберігаються для подальшої обробки.

Кожному з цих каналів відповідають граничні частоти, які перетворюються у відповідні номери спектральних компонентів. Це враховує загальну смугу аналізу df , обсяг спектрального представлення N_{Π} та ширину одного радіоканалу dF . Присвоєння порядкових номерів спектральним компонентам дозволяє сформувати послідовності номерів спектральних відліків, які відповідають частотним діапазонам активних каналів [1, 2, 7].

У кожному з цих каналів здійснюється обчислення крос-кореляції: комплексні спектральні відліки сигнального тракту $S_c(k, i, n_1)$ перемножуються з комплексно спряженими відліками опорного тракту $S_0(k, i, n_2)$. Отримані добутки підсумовуються для подальшого аналізу:

$$A_{n_1 n_2} = \sum_i S_c(k, i, n_1) S_0^*(k, i, n_2) \quad (5)$$

де k — номер радіоканалу, $1 \leq k \leq k_{\max 1}$ і i — порядковий номер спектрального відліку в межах каналу, що змінюється від 0.1 до $q-1$.

У результаті підсумовування добутків відповідних спектральних компонент для заданого k -го каналу формується спектральна складова, яка відповідає немодульованій несучій частоті відповідного радіосигналу. Враховуючи співвідношення, подані у формулах (4.3), (4.4) та (4.5), можна записати інтерференційний вектор сигналу.

$$A_{n_1, n_2} = (hE_0 \sin \beta_0)^2 K K' \exp[j(\Delta \Phi_{n_1, n_2} + \varphi - \varphi')] \quad (4.6)$$

де фазовий зсув

$$\Delta \Phi_{n_1, n_2} = \frac{2\pi}{\lambda} [R_{n_1} \cos(\Theta_0 - \alpha_{n_1}) - R_{n_2} \cos(\Theta_0 - \alpha_{n_1})] \quad (4.7)$$

Фазові зсуви $\Delta \Phi_{n_1, n_2}$ залежать від напрямку приходу радіосигналу, кута γ_{n_1, n_2} , що визначає орієнтацію відповідної пари антен, а також від базової відстані b_{n_1, n_2} між антенними елементами з номерами n_1 та n_2 .

Для досягнення високої точності вимірювань важливо забезпечити однакові комплексні коефіцієнти передачі в усіх радіоприймальних каналах. Проте реалізація широкосмугового двоканального приймача з ідентичними характеристиками каналів є складним завданням на сучасному рівні розвитку електронної техніки. У зв'язку з цим доцільно застосовувати у кореляційно-інтерференційному пеленгаторі двоканальний приймач, який має сигнальний та опорний канали і використовує спільний гетеродин.

4.2 Реалізація пеленгатора в GNU Radio за алгоритмом кореляційного інтерферометра

З метою реалізації пошукового алгоритму в кореляційному інтерферометрі запропоновано використання SDR-системи з програмним забезпеченням GNU RADIO. SDR-приймачі можуть бути гнучко налаштовані через програмне забезпечення, що дозволяє змінювати їх функціональність без апаратного втручання. Такі приймачі оснащені широкосмуговим ВЧ трактом із великим динамічним діапазоном, швидкодіючим аналого-цифровим перетворювачем, потужним сигнальним процесором і спеціалізованими цифровими фільтрами. Вони здатні приймати сигнали з різними параметрами та частотами залежно від конкретних вимог.

GNU RADIO — це сучасна гнучка програмна платформа з відкритим кодом для побудови SDR-систем. Вона дозволяє створювати пристрої у вигляді блок-схем із функціональних модулів, що виконують окремі операції обробки сигналів. Кожен блок — це умовний «чорний ящик» з кількома входами і виходами. З'єднуючи ці блоки, користувач може формувати власні конфігурації систем як у графічному інтерфейсі GNURadio Companion, так і програмно мовами Python або C++. Обробка сигналів у самих блоках реалізується на C++ з використанням обв'язки на Python.

GNU RADIO надає широкий набір блоків: джерел сигналів (генератори, вхідні аудіоінтерфейси, файли), споживачів (аналізатори спектру, осцилографи, аудіовиходи) та проміжних елементів обробки (фільтри, детектори тощо).

Також доступні блоки для розподілу обчислень між декількома комп'ютерами, що дозволяє масштабувати обробку складних сигналів.

Для реалізації кореляційно-інтерференційного пеленгатора обрали SDR-платформу Ettus USRP N210 [4, 9, 13, 14], оскільки вона ідеально підходить для роботи з GNU Radio, LabVIEW та Simulink. Для перевірки системи використовували радіопередавач, що генерує немодульований синусоїдальний сигнал на 433 МГц—частоті, доступній для прийому USRP N210. Обидва канали приймача були налаштовані на цю ж центральну частоту. Антени встановлені на відстані 35 см одна від одної, що відповідає половині довжини хвилі на 433 МГц. Система складається з SDR-плати USRP N210 з двома каналами, до яких підключено антени Вівальді [4, 5], ноутбука з встановленим GNU Radio та радіочастотного передавача. Структурна схема тестової установки показана на рис. 4.4.

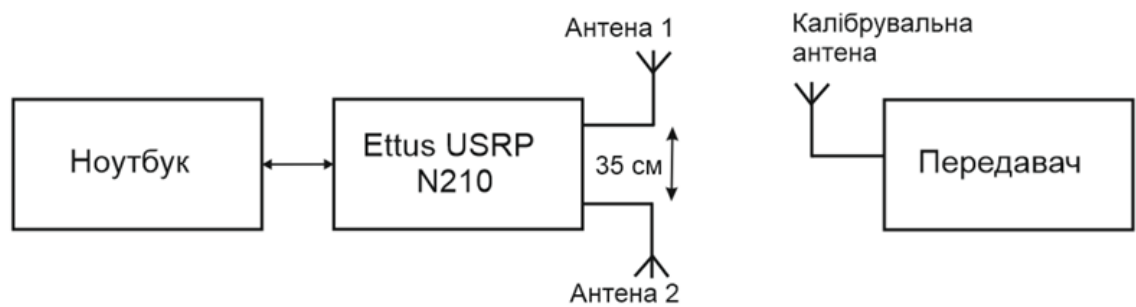


Рисунок 4.4 – Вигляд пеленгатора з використанням USRP N210

У таблиці 4.1 наведено величини абсолютної та відносної похибок вимірювання кута розташування джерела радіосигналів. Розрахунок абсолютної й відносної похибок здійснювався за такими формулами:

$$\Delta = |\varphi_{\text{вим}} - \varphi_{\text{дійс}}| \quad (4.8)$$

де

– $\varphi_{\text{вим}}$ виміряний кут розміщення джерела, градуси;

- $\varphi_{\text{дійс}}$ дійсний кут розміщення джерела,

градуси.

$$\varepsilon = \frac{|\varphi_{\text{вим}} - \varphi_{\text{дійс}}|}{\varphi_{\text{дійс}}} * 100\% \quad (4.9)$$

Таблиця 4.1 - Величини абсолютної та відносної похибок під час вимірювання кута розміщення джерела радіосигналів

Дійсний кут, градуси	Виміряний кут, градуси	Абсолютна похибка, градуси	Відносна похибка, %
-90	-92,6	2,6	2,89%
-75	-78,8	3,8	5,07%
-60	-62,59	2,59	4,32%
-45	-47,37	2,37	5,27%
-30	-33,86	3,86	12,87%
-20	-23,52	3,52	17,60%
-15	-18,67	3,67	24,47%
-10	-13,84	3,84	38,40%
10	7,49	2,51	25,10%
15	17,59	2,59	17,27%
20	23,34	3,34	16,70%
30	32,78	2,78	9,27%
45	46,94	1,94	4,31%
60	57,53	2,47	4,12%
75	77,47	2,47	3,29%
90	93,54	3,54	3,93%

На рисунку 4.5 зображено реалізацію пеленгатора в GNU Radio за алгоритмом кореляційного інтерферометра. Програмна схема складається з таких компонентів:

- SDR Source (блок приймача SDR)
- Два блоки Decimating FIR Filter (проріджуючі КІХ-фільтри)
- Два блоки Stream to Vector (перетворювачі потоку в вектор)
- QT GUI Frequency (графічний інтерфейс для відображення спектра)
- Cross Correlator (блок кореляційного інтерферометра)
- Vector to Stream (блок перетворювача вектора в потік)

- QT GUI Time Sink (графічний інтерфейс для відображення сигналу в часовій області)

Таким чином, отримана програмна модель включає прийом сигналу, його попередню фільтрацію, формування спектральних векторів, обчислення кореляційних коефіцієнтів, а також візуалізацію результатів у частотній і часовій областях.

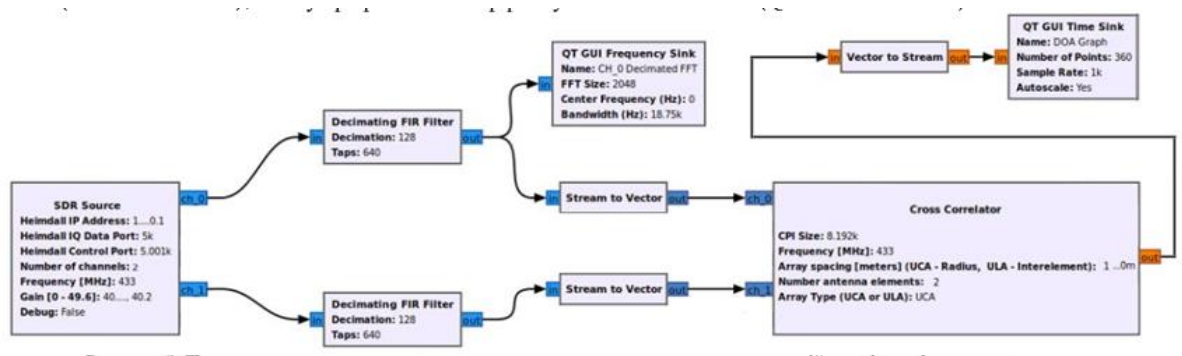


Рисунок 4.5 – Вигляд програмної моделі пеленгатора

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Створення безпечних умов праці є ключовим фактором для забезпечення високої продуктивності та мінімізації ймовірності травматизму й професійних захворювань на виробництві. Для цього необхідна комплексна політика, що враховує особливості кожного підприємства та гарантує дотримання базових норм безпеки для працівників. Керівництво та власники компаній несуть відповідальність за безпеку праці, впроваджуючи ефективні заходи безпеки, навчаючи персонал правилам безпеки, здійснюючи постійний контроль умов праці, своєчасно оновлюючи безпечне обладнання та організовуючи регулярні тренінги з питань безпеки для всього персоналу. Такий підхід сприяє зниженню рівня виробничої захворюваності та економічних збитків, пов'язаних з порушеннями правил безпеки.

Виконання кваліфікаційної роботи на тему «Використання SDR радіо для виявлення імпульсних та ЛЧМ сигналів» відбувалася в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На дослідника, відповідно до Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу можуть мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

Відповідно до визначених факторів формуємо рішення щодо безпечного виконання роботи.

5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

5.1.1. Обладнання приміщення та робочого місця

Сучасний промисловий розвиток характеризується безперервною автоматизацією та оптимізацією виробничих процесів. В умовах сьогоденної економіки використання комп'ютерної техніки стало невід'ємною частиною діяльності практично будь-якого підприємства. З огляду на це, чинне законодавство України, зокрема в сфері охорони праці, встановлює чіткі норми та вимоги до експлуатації комп'ютерної техніки на виробництвах, що регламентуються такими нормативними актами, як ДСанПіН 3.3.2.007-98, НПАОП 0.00-7.15-18, ДСТУ 8604:2015 та іншими.

Приміщення, що використовуються для роботи з комп'ютерною технікою, повинні відповідати затвердженій проєктній документації будівлі, узгодженій з відповідними державними інституціями. Окрім цього, роботодавець несе відповідальність за неухильне дотримання санітарних норм і вимог щодо освітлення, мікроклімату (температури та вологості повітря), вібрації, рівня шуму та пожежної безпеки, детально прописаних у згаданих нормативних актах. У випадку виявлення будь-яких невідповідностей встановленим санітарним нормам та вимогам безпеки на робочому місці, роботодавець зобов'язаний оперативно вжити заходів для їхньої ліквідації та покращення умов праці. Більше того, для забезпечення безпечної та ефективної роботи необхідно систематично контролювати технічний стан офісної техніки та своєчасно проводити її планове технічне обслуговування. Регулярні інспекції робочих місць на предмет дотримання норм охорони праці та впровадження профілактичних заходів є ключовими для мінімізації ризику нещасних випадків та підвищення загальної продуктивності праці на підприємстві.

Організація робочого місця дослідника здійснювалася із дотриманням таких вимог:

- робочі місця з відеотерміналами й ПК розміщуються на відстані не менш 1 м від стін зі світловими прорізами;

- відстань між бічними поверхнями відеотерміналів повинна бути не менше 1,2 м;
- відстань між тильною поверхнею одного відеотермінала й екраном іншого не повинна бути менше 2,5 м;
- прохід між рядами робочих місць повинен бути не менше 1 м.

Монітор і клавіатура розміщені на оптимальній відстані не менше 60 сантиметрів від очей користувача, що відповідає розміру відображуваних символів. Клавіатура розташована на окремій регульованій по висоті підставці, на відстані 10-30 сантиметрів від переднього краю столу. Кут її нахилу може змінюватися в діапазоні від 5 до 15 градусів. Таке ергономічне розташування екрана та клавіатури сприяє зниженню напруги на очі та м'язи працівника, підвищує зручність роботи з комп'ютером та зменшує ймовірність дискомфорту або втоми. Можливість регулювання висоти та кута нахилу клавіатури забезпечує комфортне положення рук, запобігаючи потенційним негативним наслідкам для м'язів і суглобів.

Згідно з вимогами НПАОП 0.00-7.15-18, площа приміщень, в яких використовують відеотермінали, має бути не менше 6,0 м², а об'єм – не менше 20,0 м³ на одне робоче місце з відеотерміналом, враховуючи максимальну кількість осіб, які одночасно працюють у зміні. Порівнявши ці вимоги з фактичними розмірами приміщень, було виявлено, що встановлені нормативи не дотримуються. Це може негативно впливати на здоров'я працівників. Тому було запропоновано зменшити кількість робочих місць з комп'ютером в розглянутому приміщенні.

5.1.2 Електробезпека приміщення

Приміщення, в якому здійснювалася робота, класифікується як приміщення 1-го класу електробезпеки, що свідчить про відсутність підвищеного ризику ураження електричним струмом. У даному робочому просторі забезпечені безпечні умови праці, що характеризуються низьким

рівнем вологості та запиленості повітря, підтриманням комфортної температури, наявністю ізоляційного покриття підлоги та використанням обладнання з мінімальною кількістю заземлених елементів. Такі умови сприяють не лише зниженню ризику електротравм, але й збереженню працездатності чутливого електронного обладнання, що використовується в процесі розробки. Регулярний контроль за підтриманням зазначених параметрів є запорукою створення безпечного та продуктивного робочого середовища.

На робочому місці присутній металевий корпус системного блоку комп'ютера, який має вбудовану ізоляцію для забезпечення безпеки. У цьому корпусі передбачено також елемент для заземлення та провід із заземлюючим проводом, який приєднується до джерела живлення. Електротехнічне обладнання, включаючи апаратуру, кабелі та розподільні пристрої, різних видів і напруг, гарантує надійну роботу як у звичайних умовах, так і в разі коротких замикань, перенапруг і перевантажень.

Для забезпечення безпеки експлуатації електрообладнання впроваджено наступні технічні рішення: струмопровідні елементи унеможливлені для випадкового дотику (застосовано приховане прокладання проводки або її розміщення в захисних коробах); забезпечено ізоляцію струмопровідних частин з опором не менше 1 кОм/В, яка підлягає регулярній перевірці та технічному обслуговуванню; в системі освітлення використовується напруга 220 В із заземленою нейтраллю; для захисту від коротких замикань та перевантажень встановлено запобіжники та автоматичні вимикачі; усі металеві частини обладнання та електричних систем підключено до контуру заземлення для ефективного відведення надлишкової напруги та запобігання електротравмам; застосовуються високоякісні кабелі, що відповідають чинним стандартам безпеки та електробезпеки; здійснюється постійний нагляд та планове профілактичне обслуговування електротехнічного обладнання та ізоляції для своєчасного виявлення та усунення потенційних несправностей. Окрім того, для підвищення рівня безпеки рекомендується використовувати пристрої захисного відключення на найбільш небезпечних ділянках електромережі. Також важливим є проведення періодичних вимірювань опору

ізоляції та контуру заземлення кваліфікованим персоналом. Забезпечення належного маркування електропроводки та розподільних щитів полегшує їх обслуговування та підвищує безпеку експлуатації.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат виробничого середовища являє собою комплекс фізичних параметрів, що впливають на тепловий баланс людини, включаючи температуру, вологість, швидкість руху повітря та теплове випромінювання. Відхилення температури від оптимальних значень як у бік підвищення, так і зниження, може призвести до порушення терморегуляції, дискомфорту, зниження продуктивності, а в екстремальних випадках – до переохолодження або теплового удару. Недостатня вологість може спричинити сухість слизових оболонок та подразнення очей, тоді як надмірна вологість сприяє посиленому потовиділенню та відчуттю нестачі повітря. Завищена швидкість руху повітря може викликати переохолодження, а недостатня – призводить до застою повітря та відчуття задухи.

Робота дослідника згідно Гігієнічної класифікації праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу за енерговитратами відноситься до категорії 1а. Допустимі параметри мікроклімату для категорії 1а наведені в табл.2.1.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t , °C	h , %	v , м/с
Теплий	2-28	5	,1-0,2
Холодний	1-25	5	,1

Для забезпечення оптимальних мікрокліматичних умов у приміщенні використовується система кондиціонування повітря з можливістю індивідуального регулювання температури, система центрального опалення та

систематичне вологе прибирання приміщення.

5.2.2. Склад повітря робочої зони

Вдихання шкідливих речовин, що можуть бути присутні в повітрі робочої зони, становить значну загрозу для здоров'я працівників, спричиняючи широкий спектр захворювань. До них належать професійні хвороби дихальної системи (такі як силікоз, азбестоз, пневмоконіози), алергічні реакції (включаючи бронхіальну астму, алергічний риніт, дерматити), інтоксикації та навіть онкологічні захворювання. Крім того, забруднене повітря може негативно впливати на працездатність, проявляючись у втомі, сонливості, головних болях, запамороченнях, погіршенні концентрації уваги та зростанні ймовірності помилок, а також підвищувати емоційну збудливість.

В приміщенні, де здійснюється дослідження, можливими шкідливими речовинами у повітрі є пил, озон та вуглекислий газ. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, згідно ДСН 3.3.6.042-99, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимальн о разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	25	10	4
Озон	0,1	0,03	1
Вуглекисли й газ	3	1	4

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл..5.3).

Таблиця 5.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n ⁺	n ⁻
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Підтримання належної якості повітря в робочій зоні забезпечується комплексом заходів, що включає: функціонування системи кондиціонування для контролю температури, вологості та рівня чистоти повітря; регулярне провітрювання приміщення з метою ефективного видалення шкідливих домішок, таких як пил, гази та пари; а також систематичне вологе прибирання для усунення пилу, бруду та мікроорганізмів з поверхонь. Додатково, для покращення якості повітря, можуть використовуватись повітряні фільтри різного ступеня очистки, а також системи місцевої вентиляції у зонах з підвищеним ризиком забруднення. Важливим є також контроль за джерелами потенційних забруднень та їх своєчасна ізоляція або усунення. Регулярний моніторинг складу повітря робочої зони дозволяє оцінити ефективність вжитих заходів та своєчасно коригувати їх.

5.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення на виробництві є ключовим фактором для створення безпечних, зручних та ефективних умов праці, оскільки воно істотно впливає на:

1. Здоров'я та продуктивність працівників. Недостатній або надмірний рівень освітленості може викликати втому очей, погіршення зору, головні болі та підвищувати ймовірність травм. Натомість, належне освітлення сприяє покращенню самопочуття, знижує рівень стресу та тривожності, а також

позитивно впливає на настрій і мотивацію.

2. Безпеку праці. Якісне освітлення робочого простору забезпечує кращу видимість предметів, інструментів та обладнання, що зменшує ризик травматизму та аварійних ситуацій. У випадку надзвичайних подій, таких як пожежа, достатнє освітлення евакуаційних шляхів та виходів допомагає працівникам безпечно покинути приміщення.

3. Якість продукції. Неоптимальне освітлення може призвести до того, що працівники не помічатимуть дефектів продукції, що може спричинити випуск бракованих виробів. Завдяки якісному освітленню підвищується точність виконання робіт, що, в свою чергу, покращує якість кінцевого продукту.

Відтак, виробниче освітлення є важливим фактором, який сприяє покращенню умов праці, підвищенню продуктивності, економії ресурсів та зростанню конкурентоспроможності підприємства. Норми освітленості при штучному освітленні та КПО при природному та сумісному освітленні (згідно ДБН В.2.5-28:2018) зазначені у таблиці 5.4:

Таблиця 5.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Високої точності	Б, 0,3 - 0,5	II		Великий	Світлий	100	100				1,2

Робоче місце організовано таким чином, щоб уникнути прямого потрапляння світлового потоку в очі працівника. Для запобігання появі відблисків використовується обладнання з матовими, неглянцевими

поверхнями. З метою захисту зору від надмірного сонячного або штучного освітлення на вікна встановлено жалюзі та сонцезахисні козирки. Запроваджено систему регулювання яскравості штучного світла залежно від рівня природного освітлення, а також передбачено можливість локального освітлення лише робочих зон за допомогою окремих вимикачів. Для підтримання належної якості освітлення важливо максимально використовувати природне світло, регулярно очищати вікна та своєчасно замінювати несправні джерела світла.

5.2.4 Виробничий шум

Шум на робочому місці –небезпечний фактор, що може призвести до порушень слуху та стресових розладів.Тривалий вплив шуму знижує працездатність, викликає втоми та підвищує ризик нещасних випадків. Високий рівень шуму також може впливати на серцево-судинну систему, спричиняючи підвищення артеріального тиску.

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99. Норми шумового навантаження на працівника в процесі дослідження наведені в табл.5.5.

Таблиця 5.5 - Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	2	3	25	50	100	200	400	800	1600	
Виробничі приміщення	6	1	1	4	9	5	2	0	8	50

Основними заходами боротьби з шумом є зменшення або повне усунення джерел шуму безпосередньо під час технологічного процесу, а також впровадження конструктивних змін у обладнання для зниження його шумового впливу. Важливу роль відіграє використання звукопоглинаючих та

звукоізолювальних матеріалів на стінах, стелях і перегородках, що допомагають знизити рівень шуму в робочому середовищі. Раціональне зонування та планування виробничих приміщень із виділенням «тихих» і «шумних» зон сприяє зменшенню впливу шуму на працівників. Додатковими заходами є проведення регулярного контролю рівнів шуму та організація режиму праці з урахуванням періодів відпочинку.

5.3 Виробничі випромінювання

Виробничі випромінювання являють собою фізичні чинники робочого середовища, що генеруються внаслідок функціонування машин, механізмів, технологічного обладнання та інших джерел. До них належать електромагнітні, оптичні, акустичні та іонізуючі випромінювання. Сучасна комп'ютерна техніка, характеризуючись високою енергоефективністю з типовим енергоспоживанням у межах 200-250 Вт, складається з різноманітних електричних та радіоелектронних пристроїв, що базуються на різних фізичних принципах дії. Під час роботи ця техніка створює навколо себе електричні та магнітні поля, що охоплюють широкий діапазон частот і мають складний просторовий розподіл. Окрім того, потенційну небезпеку можуть становити електромагнітне випромінювання радіочастотного діапазону та електромагнітні поля, що можуть виникати від інших джерел у робочому просторі, де використовується комп'ютерна техніка. Вплив цих факторів на здоров'я працівників потребує впровадження відповідних заходів безпеки та постійного контролю.

Гранично допустимі рівні електромагнітного поля для працівника становлять наведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/м ²
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/м	
Напруженість електромагнітного поля, 6 кГц...3 МГц	50	5	
3 МГц...30МГц	2	-	
30 МГц...5 ГГц	-	-	10
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру: УФ-С (220...280 нм)			0,001
УФ-В (280...320 нм)			0,01
УФ-А (320...400 нм)			10,0
в інфрачервоній частині спектру: 0,76... 10,0 мкм			35,0.. 70,0
Напруженість електричного поля ВДТ			20 В/м

Для обмеження впливу ЕМП на дослідника слід використовувати лише якісну техніку із сертифікатом якості і дотримуватися встановленого часу роботи за ПК.

5.4 Пожежна безпека

Відповідальність за забезпечення пожежної безпеки на підприємстві несе його керівник (власник). З метою розподілу обов'язків, керівник видає наказ, яким визначає відповідальність інженерно-технічного персоналу та інших працівників за дотримання пожежної безпеки на окремих ділянках підприємства. Крім того, керівник призначає осіб, відповідальних за пожежну безпеку конкретних будівель, споруд, приміщень та за належну експлуатацію технічних засобів протипожежного захисту. У випадку відсутності на підприємстві спеціально призначеної особи, відповідальної за загальну

пожежну безпеку, організаційну роботу з підготовки необхідної документації, як правило, виконує фахівець з охорони праці.

Відповідальність за забезпечення пожежної безпеки, належне утримання та експлуатацію засобів протипожежного захисту має бути чітко регламентована у відповідних службових документах, таких як функціональні обов'язки, інструкції та положення. У приміщенні, де проводилася роботи, використовуються виключно негорючі речовини та матеріали, що перебувають у холодному стані, завдяки чому за критеріями вибухопожежної та пожежної небезпеки воно класифікується як категорія «Д». Єдину пожежну загрозу становлять кабельні електропроводки, що живлять обладнання, що є допустимим для приміщень даної категорії.

За показниками вогнестійкості дане приміщення належить до другої категорії. Робоча зона розробника класифікується як вибухонебезпечна зона В-Па та пожежонебезпечна зона П-Па, оскільки утворення вибухонебезпечної концентрації пилу та волокон можливе лише внаслідок аварійних ситуацій або несправностей обладнання.

5.4.1. Технічні рішення системи запобігання пожежі

У приміщенні, де здійснюється дослідження, потенційними причинами пожежі можуть бути: несправності в електропроводці, такі як іскріння, надмірне нагрівання провідників або втрата еластичності та руйнування електроізоляційних матеріалів; використання побутових електроприладів, зокрема електрочайників та обігрівачів, які можуть мати високе енергоспоживання та становити ризик при неправильній експлуатації; потрапляння рідини на працююче електричне обладнання, що може призвести до короткого замикання; а також залишення без нагляду ввімкнених комп'ютерів, обчислювальної техніки та інших електроприладів після закінчення робочого дня або під час перерв.

Для запобігання виникнення пожежі доцільні такі заходи: призначення

осіб, що відповідальні за пожежну безпеку приміщення; щорічне проведення повторних протипожежних інструктажів та занять за програмою пожежно-технічного мінімуму з особами, що відповідальні за пожежну безпеку; утримання в справному стані засобів протипожежного захисту; своєчасне інформування про несправність пожежної техніки, систем протипожежного захисту, водопостачання тощо.

5.4.2. Технічні рішення системи протипожежного захисту

Для локалізації можливого загоряння в приміщенні передбачено наявність переносного вуглекислотного вогнегасника типу ВВ-5, що відповідає встановленим стандартам. Доступ до первинних засобів пожежогасіння та пристроїв відключення електроживлення обладнання є вільним і незахаращеним.

У коридорі приміщення розміщено план евакуації персоналу на випадок пожежі. Евакуаційні шляхи з відділу відповідають чинним вимогам пожежної безпеки. Будівля обладнана двома евакуаційними виходами, ширина коридору становить 2-3 метри, а ширина дверних прорізів – 0,8 метра, при цьому двері відчиняються у напрямку руху людей під час евакуації. Інструкції та інші внутрішні документи підприємства, що регламентують питання пожежної безпеки, розробляються на основі діючих правил та інших державних нормативно-правових актів у сфері пожежної безпеки, з урахуванням специфіки пожежної небезпеки будівель, споруд, технологічних процесів, а також технологічного та виробничого обладнання. Загалом, приміщення за категорією вибухо- та пожежонебезпечності, а також за ступенем вогнестійкості відповідає встановленим нормам. Для забезпечення безперешкодної евакуації важливо підтримувати шляхи евакуації вільними від будь-яких сторонніх предметів. Крім того, необхідно забезпечити належне освітлення евакуаційних шляхів та позначення евакуаційних виходів світловими показниками, що працюють від автономних джерел живлення.

ВИСНОВКИ

Запропонований підхід до використання SDR-системи з програмним забезпеченням GNU RADIO для реалізації пошукового алгоритму для імпульсних та ЛЧМ сигналів демонструє високу гнучкість та ефективність. SDR-приймачі дозволяють змінювати свою функціональність без апаратного втручання, що забезпечує можливість швидкого налаштування відповідно до змінних вимог. Завдяки широкосмуговому ВЧ тракту, аналого-цифровому перетворювачу, сигнальному процесору та цифровим фільтрам такі системи здатні приймати сигнали з різними параметрами, що розширює їхню сферу застосування.

GNU RADIO як платформа з відкритим кодом дає можливість створювати програмно-реалізовані приймальні системи, використовуючи модульний підхід та графічне середовище GNURadio Companion. Це значно спрощує розробку інструментів для обробки сигналів та налаштування алгоритмів. Додатково, можливість програмування мовами Python та C++ забезпечує розширену кастомізацію та інтеграцію з іншими програмними засобами.

Проведені експерименти з використанням SDR-платформи Ettus USRP N210 продемонстрували її відповідність вимогам кореляційно-інтерференційного пеленгатора. Результати вимірювань, представлені у таблиці 4.1, підтверджують, що точність визначення кута розміщення джерела сигналу досягається з мінімальною абсолютною та відносною похибкою. Побудова програмної схеми кореляційного інтерферометра у GNU Radio дозволила ефективно реалізувати аналіз вхідних сигналів та визначити їхні параметри.

Таким чином, використання SDR-технологій та GNU RADIO для виявлення імпульсних та ЛЧМ сигналів є перспективним напрямом, що забезпечує гнучкість налаштувань, точність обробки сигналів та розширені можливості аналізу. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію алгоритму кореляційного інтерферометра та розширення спектру аналізованих сигналів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Що таке технологія SDR та як вона працює [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://technology.woodstar.com.ua/shho-take-tekhnologiya-sdr-ta-yak-vona-pracyuie/>
2. Direction Finding in GNU-Radio [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://www.gnuradio.org/grcon/grcon17/presentations/gr_doa_gnuradio_direction_finding/Travis-Collins_gr-doa.pdf
3. Гончаренко І.В., Богданович В.А., "Перспективи застосування програмно-конфігурованих радіосистем в умовах мобільних мереж", Збірник наукових праць Української академії зв'язку, випуск 1, с. 123-128, 2020.
4. Design of directional modulation radio [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://apps.dtic.mil/sti/trecms/pdf/AD1126490.pdf>
5. Гула І., Полікаровських О. Використання програмної платформи GNU RADIO для реалізації пошукового алгоритму пеленгатора кореляційного інтерферометра Вісник Хмельницького національного університету. Том 2, с.147-153, 2023.
6. Software defined radio based angle of arrival for first responder scenarios [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/4961
7. GNU Radio + USRP2 Implementation of a Single-Carrier Zero-Correlation-Zone CDMA System [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:635222/FULLTEXT01.pdf>
8. Mirel Păun, Răzvan Tamas, Ion Marghescu "A software-defined radio approach for direction finding" U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 77, Iss. 4, pp. 235-244, 2015
9. P.J. Gibson, "The Vivaldi aerial", in Proceedings of the European Microwave Conference, vol. 9, pp. 101 105, 1979.
10. RTL-SDR Technical Support [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://coherentreceiver.com/getting-started#>
11. Direction of Arrival Analysis on a Mobile Platform [Електронний ресурс] -

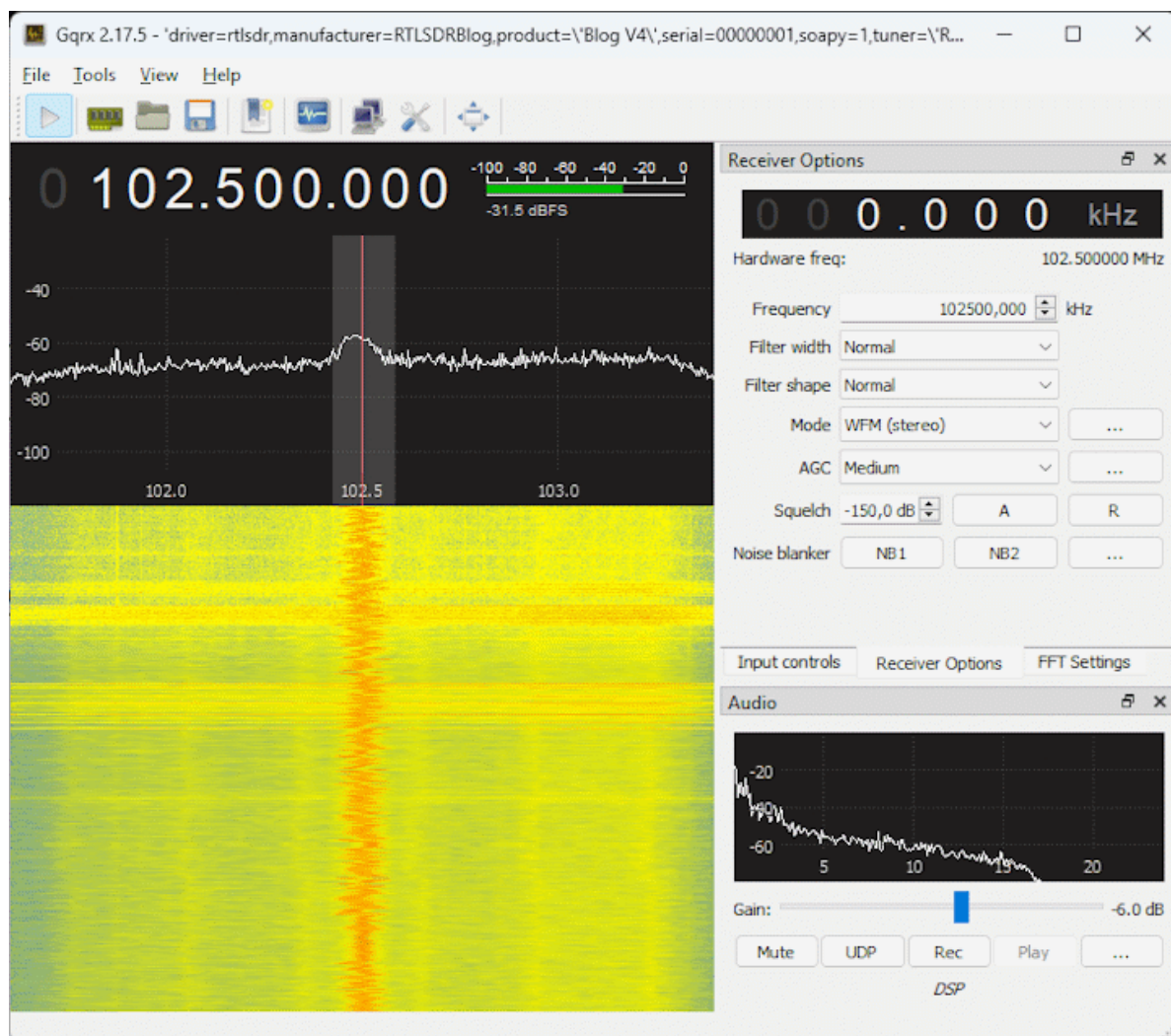
- Режим доступу: https://www.gnuradio.org/grcon/grcon17/presentations/real-time_direction_finding/Todd-Moon-Gnuradio DOA.pdf
12. Direction Finding in GNU-Radio [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://www.gnuradio.org/grcon/grcon17/presentations/gr_doa_gnuradio_direction_finding/Travis-Collins gr-doa.pdf
 13. 07495 Ettus N200-210 DS Flyer.indd [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://www.ettus.com/wp_content/uploads/2019/01/07495_Ettus_N200-210_DS_Flyer_HR_1.pdf
 14. A phase-coherent software-defined radio with five RTL-SDRs [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.crowdsupply.com/krakenrf/krakensdr/updates/all-backer-krakensdr-units-shipped-customer-feedback-virtualbox-and-gnu-radio-block>
 15. A.D. Redondo, T. Sanchez, C. Gomez, L. Betancur, R.C. Hincapie, "MIMO SDR-based implementation of AoA algorithms for Radio Direction Finding in spectrum sensing activities", 2015 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM), pp.1-4, 13-15, May 2015.
 16. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги - [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028
 17. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України від 08 квітня 2014 року № 248
 18. ДСанПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/derzhavni-sanitarni-pravila-i-normi-roboti-z-vizualnimi-disp-nor4881.html>
 19. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

20. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
21. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://dnop.com.ua/dnaop/act3167.htm>
22. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_праор_0_00-7_15-18_01_ua.php
23. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення- [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
24. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI
25. НАПБ А.01.001-14 Правила пожежної безпеки в Україні [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z1410-04>
26. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759
27. ДБН В.1.1.7-2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002..pdf

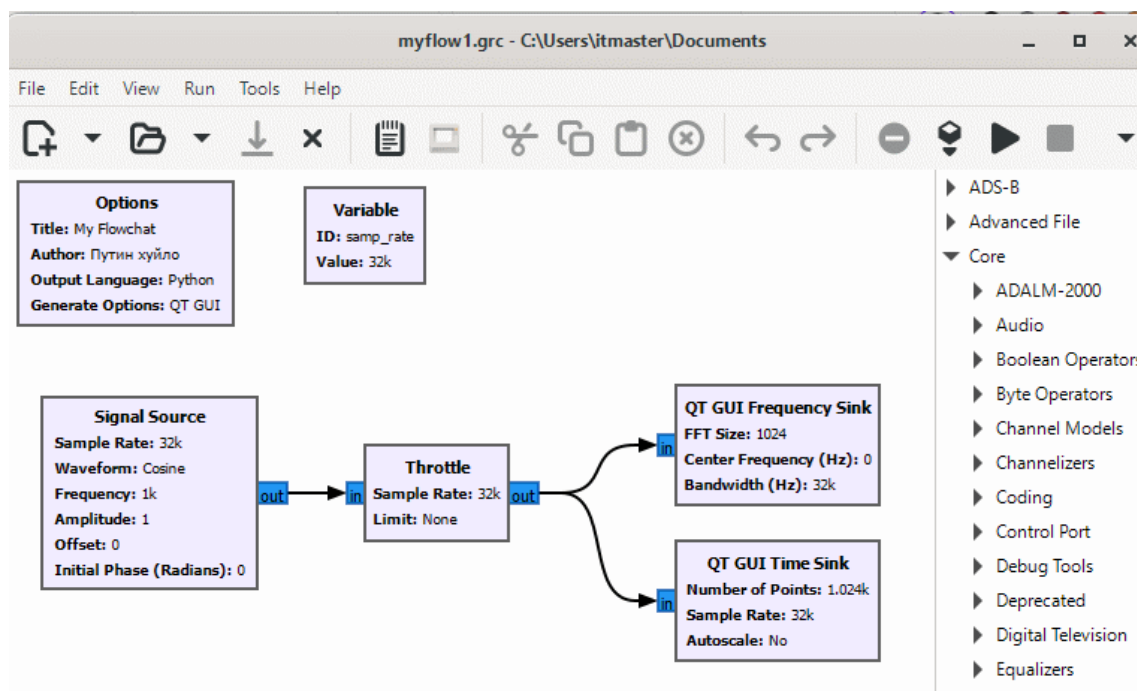
Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ВИКОРИСТАННЯ SDR РАДІО ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ТА ЛЧМ
СИГНАЛІВ

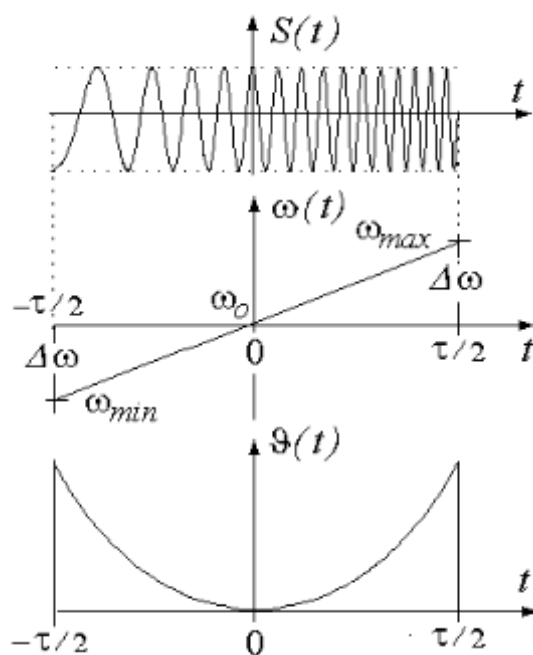
назва бакалаврської кваліфікаційної роботи



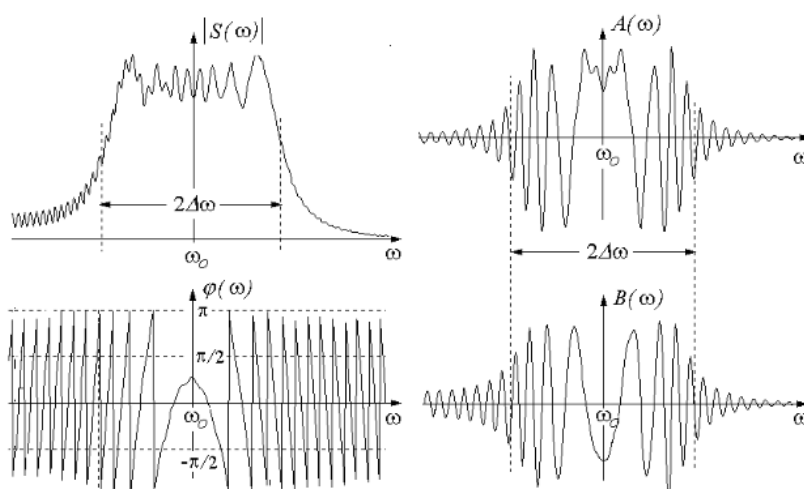
Вигляд основного вікна програми-приймача Sqrх.



Вигляд основного вікна утиліти GNU Radio Companion



Вигляд лінійно-частотно модульованого сигналу



- Спектр ЛЧМ-сигналу з базою $B = 15$

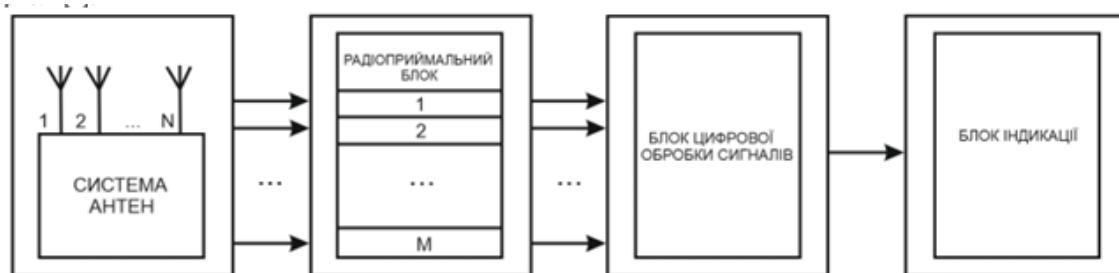
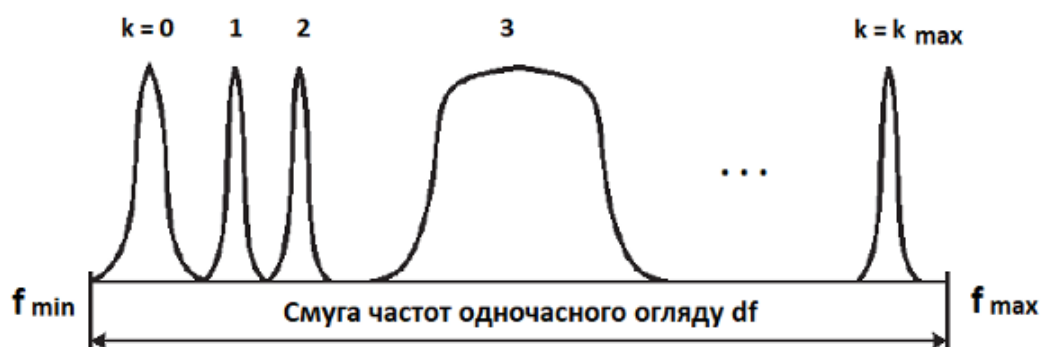
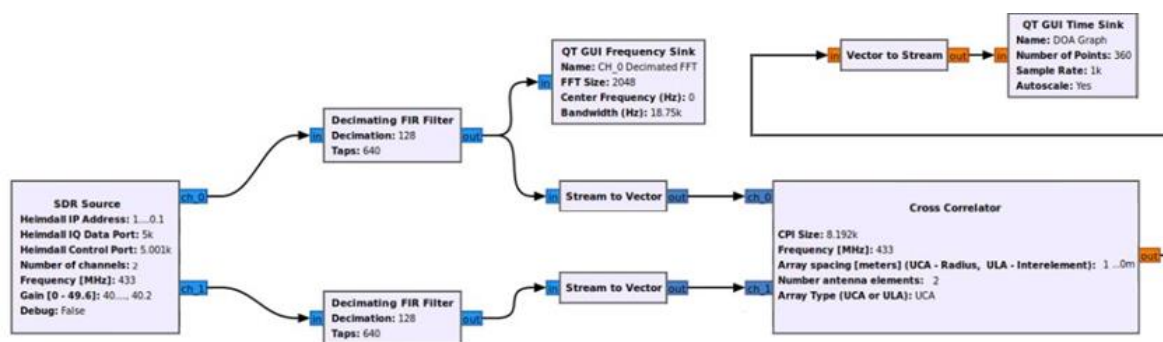


Схема радіопеленгатора



Вигляд спектрів сигналів які приймаються панорамним приймачем



Вигляд програмної моделі пеленгатора

Додаток Б

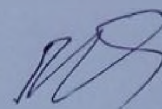
ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Використання SDR радіо для виявлення імпульсних та ЛЧМ сигналівТип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)Підрозділ каф. ІКСТ ФІЕС гр. ПЗТ-23мс
(кафедра, факультет, навчальна група)Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 8,08 %

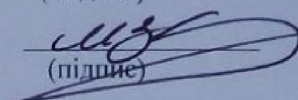
Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

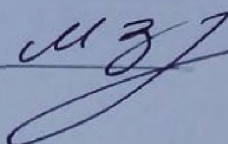
Експертна комісія:

Кирик В.М. зав. каф. ІКСТ
(прізвище, ініціали, посада)Васильківський М.В. доц. каф. ІКСТ
(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)



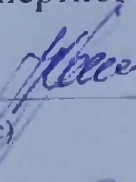
(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку
(підпис)Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

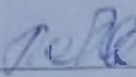
(підпис)

Крижановський В.Г. д.т.н., проф. Каф. ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Рибак Р.А.

(прізвище, ініціали)