

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО ”  
Факультет електроніки  
Кафедра електронної інженерії

До захисту допущено  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ В. І. Тимофєєв  
“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## Дипломна робота

освітнього рівня «бакалавр»  
за спеціальністю 153 мікро- та наносистемна техніка

на тему «Аналізатор спектрограм радіочастотних випромінювань у  
реальному масштабі часу»

Виконав(ла) студент 4 курсу, групи ДМ-01

Чопик Владислав Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Керівник к.т.н., доц. Вунтесмері Ю.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_

(назва розділу)

(вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ (підпис)

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

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2024 року



**“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки  
Кафедра електронної інженерії  
Освітній рівень «бакалавр»  
за спеціальністю 153 мікро- та наносистемна техніка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри**

В. І. Тимофеев

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Чопик Владислав Вікторович

1. Тема роботи “ Аналізатор спектрограм радіочастотних випромінювань у реальному масштабі часу ”, керівник роботи: доц, к.т.н. Вунтесмері Юрій Володимирович,  
затверджені наказом по університету від “23” травня 2024 року № 2076-с
2. Строк подання студентом роботи: 12.06.2024
3. Вихідні дані до роботи: літературні джерела щодо програмно-визначуваних радіосистем, теорії сигналів
4. Зміст дипломної роботи (перелік питань, які потрібно розробити): дослідження алгоритмів для аналізу спектрограм у реальному масштабі часу
5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов’язкових креслень, плакатів, презентацій тощо): презентація MS Power Point.
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання
-

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Проведення літературного огляду щодо використання програмно-визначуваних радіосистем	17.04.2024 - 30.04.2024	
2	Проведення літературного огляду щодо побудови, та обробки даних спектрограм	30.04.2024 - 15.05.2024	
3	Побудова узагальненого алгоритма детектору	15.05.2024 - 29.05.2024	
4	Відлагодження програми для побудови спектрограми	29.05.2024 - 12.06.2024	
5	Оформлення дипломної роботи	01.06.2024-12.06.2024	
6	Підготовка до захисту	12.06.2024-20.06.2024	

Студент \_\_\_\_\_ Чопик В. В. \_\_\_\_\_

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Вунтесмері Ю.В. \_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

### SDR, АНАЛІЗАТОР СПЕКТРУ

Дослідити та розробити алгоритми для високоефективного аналізу спектрограм у реальному часі, що забезпечить вирішення актуальних задач у сфері радіочастотного моніторингу, аналізу сигналів та радіорозвідки.

У першому розділі розглядаються теоретичні основи спектрального аналізу, історія його розвитку, будова спектроаналізаторів та виклики, пов'язані з аналізом спектрограм у реальному часі.. Другий розділ присвячений методам побудови та обробки даних спектрограми. У цьому розділі описуються алгоритми та техніки, що використовуються для отримання спектрограм з сигналів. Особлива увага приділяється методам швидкого перетворення Фур'є (FFT), параметрам розгортки та методам постобробки. У третьому розділі розглядаються спектральні характеристики різних типів модуляції та методи їх класифікації на основі спектрограм. У четвертому розділі розглядається практичне застосування алгоритмів аналізу спектрограм за допомогою технології Software Defined Radio (SDR). Зосереджено увагу на бібліотеці SoapySDR, яка спрощує роботу з різними SDR платформами. Проведено порівняльний аналіз популярних платформ та детально описано HackRF One, використану для експериментів. Представлено результати практичних експериментів.

## ABSTRACT

### SDR, SPECTRUM ANALYZER

To research and develop algorithms for highly efficient real-time analysis of spectrograms, which will provide solutions to urgent problems in the field of radio frequency monitoring, signal analysis, and radio reconnaissance.

The first chapter discusses the theoretical foundations of spectral analysis, the history of its development, the structure of spectrum analyzers, and the challenges associated with real-time spectrogram analysis. The second section is devoted to methods of building and processing spectrogram data. This chapter describes the algorithms and techniques used to obtain spectrograms from signals. Particular attention is paid to Fast Fourier Transform (FFT) methods, scan parameters, and post-processing methods. The third chapter discusses the spectral characteristics of different types of modulation and methods of their classification based on spectrograms. The fourth chapter discusses the practical application of spectrogram analysis algorithms using Software Defined Radio (SDR) technology. Attention is focused on the SoapySDR library, which simplifies work with various SDR platforms. A comparative analysis of popular platforms is carried out and HackRF One, used for experiments, is described in detail. The results of practical experiments are presented.

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	8
ВСТУП	10
1 ЗАДАЧА АНАЛІЗУ СПЕКТРОГРАМ	12
1.1 Що таке спектрограма (як функція спектру у часі)	12
1.2 Історія аналізу спектру в часі	18
1.3 Узагальнена конструкція спектроаналізатора	20
1.4 Керування вимірюванням спектрограми	25
2 ПОБУДОВА, ТА ОБРОБКА ДАНИХ СПЕКТРОГРАМИ	27
2.1 Побудова спектрограми	27
2.2 Побудова Скалограми	29
2.3 Фільтрація, віконні фільтри	32
2.4 Нормалізація та оцінка рівня завад	38
2.5 Вейвлет та інші перетворення	41
2.6 Трекінг спектру передавача	46
2.7 Постобробка	49
3 ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРОГРАМ ДЛЯ ДЕТЕКЦІЇ МОДУЛЬОВАНИХ РАДІОПЕРЕДАЧ	52
3.1 Спектр радіопередачі ( детекція основної частоти і гармонік )	52
3.2 Спектр частотно модульованого сигналу	53
3.3 Спектр фазоманіпульованого сигналу	57
3.4 Спектр OFDM	64
3.5 Спектр ППРЧ	67
3.6 Узагальнений алгоритм детектора	70
4 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТ	72
4.1 Поняття технології SDR	72
4.2 SoapySDR, як бібліотека для уніфікації використання SDR	73
4.3 Порівняння SDR	74
4.4 Технічні характеристики HackRF	77

	8
4.5 Результати експерименту	80
ВИСНОВКИ	85
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	86
ДОДАТОК А	92

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

- 8PSK (8-ary Phase Shift Keying) – вісімкова фазова модуляція
- АЦП (Analog-to-Digital Converter) - Аналого-Цифровий Перетворювач.
- CP (Cyclic Prefix) - Циклічний префікс.
- CWT (Continuous Wavelet Transform) - Неперервне вейвлет-перетворення.
- DFT (Discrete Fourier Transform) - Дискретне перетворення Фур'є.
- DSP (Digital Signal Processing) - Цифрова обробка сигналів.
- DWT (Discrete Wavelet Transform) - Дискретне вейвлет-перетворення.
- FFT (Fast Fourier Transform) - Швидке перетворення Фур'є.
- FFTW (Fastest Fourier Transform in the West) - бібліотека швидкого перетворення Фур'є.
- FM (Frequency Modulation) - Частотна модуляція.
- HPC (High-Performance Computing) - Високопродуктивні обчислення.
- ISI (Inter-Symbol Interference) - міжсимвольна інтерференція.
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) - Ортогональне частотне мультиплексування.
- ППРЧ - Псевдовипадкова перебудова робочої частоти
- ПЧ (Intermediate Frequency) - Проміжна Частота.
- QAM (Quadrature Amplitude Modulation) - Квадратурна амплітудна модуляція.
- QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) - Квадратурна фазова маніпуляція.
- SDR (Software Defined Radio) - Програмно-визначуване радіо.
- SNR (Signal-to-Noise Ratio) - Співвідношення сигнал/шум.
- STFT (Short-Time Fourier Transform) - Короткочасне перетворення Фур'є.

## ВСТУП

В умовах стрімкого розвитку радіотехнічних систем та збільшення кількості бездротових пристроїв, аналіз спектрів радіочастотних випромінювань стає все більш актуальним завданням. Ця необхідність зумовлена не тільки зростанням обсягів інформації, що передається по радіоканалах, а й важливістю забезпечення ефективного використання радіочастотного спектру, виявлення перешкод і нелегальних передавачів, зокрема безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Аналізатор спектру у реальному масштабі часу є важливим інструментом для дослідження та моніторингу радіочастотного середовища. Він дозволяє оперативно виявляти та аналізувати різні види сигналів, що є критично важливим у таких сферах, як телекомунікації, радіолокація, радіоастрономія, та інші галузі, де необхідно контролювати та аналізувати частотний спектр у реальному часі.

Метою даної дипломної роботи є дослідження алгоритмів для аналізу спектрограм у реальному масштабі часу та їх застосування для детекції БПЛА.

У першому розділі роботи представлено загальну інформацію щодо задачі аналізу спектрограм, що включає визначення спектрограм, їх основні характеристики та області застосування. Другий розділ присвячено методам побудови та обробки даних спектрограм. У цьому розділі детально розглянуто алгоритми та техніки, що використовуються для отримання спектрограм із сигналів, зокрема методи швидкого перетворення Фур'є (FFT), параметри розгортки та методи постобробки. Третій розділ аналізує особливості спектрів різних видів сигналів, що дозволяє краще зрозуміти специфіку обробки кожного типу сигналу. Четвертий розділ описує

програмне забезпечення, тестовий стенд та результати експерименту, що підтверджують ефективність розроблених алгоритмів.

Таким чином, ця дипломна робота не тільки надає теоретичний огляд сучасних методів аналізу спектрограм, а й демонструє практичні результати їхнього застосування, що є важливим для подальшого розвитку радіотехнічних систем та розробки ефективних детекторів БПЛА.

## 1 ЗАДАЧА АНАЛІЗУ СПЕКТРОГРАМ

### 1.1 Що таке спектрограма (як функція спектру у часі)

Спектрограми — це потужні інструменти, які використовуються в обробці та аналізі сигналів для візуального представлення частотних компонентів сигналу в часі [1]. Надаючи повний огляд того, як частотний вміст сигналу змінюється з часом, спектрограми дають цінну інформацію про різні сфери, такі як обробка мови, аналіз музики та інтерпретація радіолокаційних сигналів. Розглянемо характеристики, компоненти та застосування спектрограм, щоб пролити світло на їх важливість для розуміння динаміки сигналів.

Спектрограму можна визначити як візуальне представлення частотних компонентів сигналу, які змінюються з часом. На відміну від традиційних представлень частотної області, які надають інформацію про частотний вміст у певний момент часу, спектрограми пропонують динамічне уявлення про те, як змінюється частотний склад протягом тривалості сигналу [2]. Ця характеристика робить спектрограми особливо корисними для аналізу сигналів, що змінюються в часі, де розуміння частотної модуляції та часових змін є важливим для розуміння властивостей сигналу. У обробці й аналізі сигналів спектрограми відіграють вирішальну роль у таких завданнях, як розпізнавання мови, обробка звуку та аналіз вібрації.

Уявіть собі музичний твір. Спектрограма цього запису покаже, які ноти та тони присутні в музиці, а також як вони змінюються з часом. Високі звуки розташовуються вище на спектрограмі, а низькі - нижче. Чим гучніший звук, тим ширшою буде його смуга на спектрограмі.

Спектрограми знаходять застосування в різних галузях:

- Аналіз мовлення: Дослідження характеристик мови, таких як інтонація та наголос [3].

Наприклад, спектрограма мовного сигналу показує основні частоти мовця, а також форманти - резонансні частоти ротової порожнини, які визначають звучання голосних звуків (рис. 1.1).

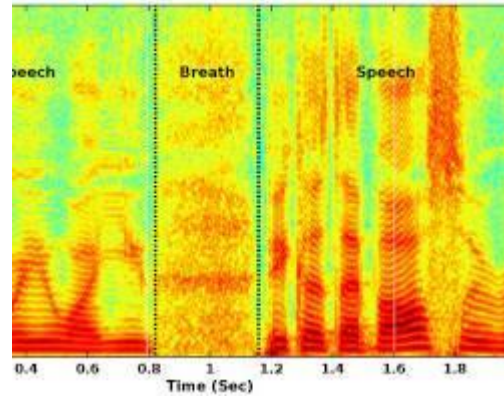


Рисунок 1.1 – Приклади спектрограм (мова) [4]

- Розпізнавання мовлення: Допомога комп'ютерам у розумінні мови.
- Музика: Аналіз музики, створення звукових ефектів та візуалізація музичних творів.

Наприклад, спектрограма музичного запису показує ноти та тони, які складають мелодію та гармонію, а також динаміку гучності протягом композиції (рис. 1.2).

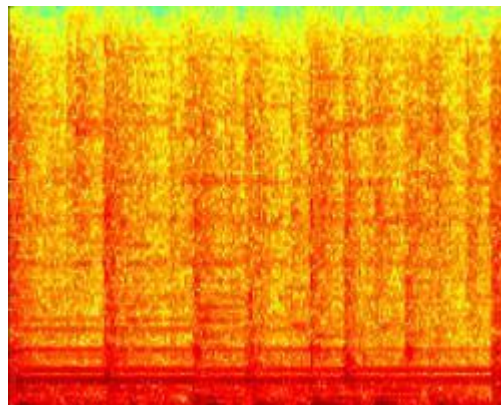


Рисунок 1.2 – Приклади спектрограм (музика) [5]

- Гідролокація: Виявлення об'єктів під водою, таких як човни та підводні човни.

Наприклад, спектрограма сонара показує відбиті звукові сигнали, які використовуються для виявлення об'єктів під водою (рис. 1.3).

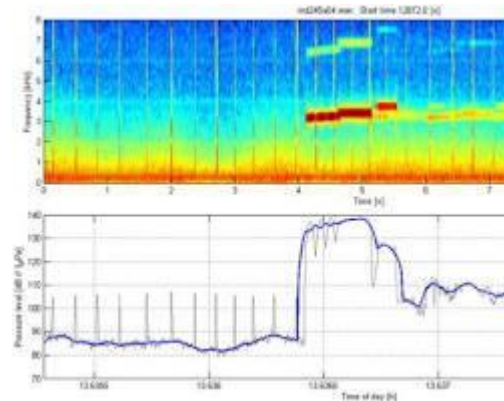


Рисунок 1.3 – Приклади спектрограм (сонор) [6]

- Сейсмологія: Вивчення землетрусів та будови Землі.
- Медицина: Діагностика захворювань, наприклад, проблем з серцем та голосових розладів.

Це лише деякі з прикладів. Спектрограми - це потужний інструмент для дослідження широкого спектру явищ. Спектрограми - це цінний інструмент для аналізу сигналів, який дозволяє візуалізувати їх спектральний вміст та зміни в часі [7]. Вони мають широке застосування в різних галузях, таких як аналіз мовлення, розпізнавання мовлення, музика, гідролокація, сейсмологія та медицина.

Спектрограми складаються з двох основних осей:

- Часова вісь: Відповідає за час і показує, як змінюється сигнал протягом його тривалості.
- Частотна вісь: Відповідає за частоту і показує, які частотні компоненти містить сигнал [8].

Яскравість або колір спектрограми вказує на інтенсивність спектральних компонентів. Чим яскравіша область, тим більша інтенсивність сигналу на цій частоті в цей момент часу.

За допомогою спектрограм можна візуалізувати різні характеристики сигналу:

- Частотний вміст: Які частотні компоненти містить сигнал.
- Зміни частоти: Як частота сигналу змінюється з часом (наприклад, для аналізу інтонації мови) [9].
- Нестационарність: Як інтенсивність сигналу на різних частотах змінюється з часом (таб. 1.1).

Таблиця 1.1 – Характеристики сигналу, які візуалізуються за допомогою спектрограм [4], [10].

Характеристика	Опис	Шкала вимірювання	Приклад
Частотний вміст	Які частотні компоненти містить сигнал.	Герц (Гц)	Спектрограма мови показує, що мова містить широкий спектр частот, з акцентом на нижчі частоти (100-250 Гц) для голосних і вищі частоти (2000-4000 Гц) для приголосних.
Зміни частоти	Як частота сигналу змінюється з часом.	Герц на секунду (Гц/с)	Спектрограма співу показує, як співак змінює висоту звуку протягом пісні (наприклад, від 200 Гц до 1000 Гц).
Нестационарність	Як інтенсивність сигналу на різних частотах змінюється з часом.	Децибели (дБ)	Спектрограма удару по барабану показує, що удар генерує короткий імпульс енергії на широкому спектрі частот (-20 дБ до 0 дБ), який потім швидко згасає (-30 дБ до -40 дБ).

Спектрограми - це потужний інструмент для візуалізації та аналізу сигналів. Вони можуть допомогти нам краще зрозуміти широкий спектр явищ, від музики та мови до землетрусів та медичних станів. Наведемо додаткові приклади:

- Музика: Спектрограма музичного твору може показати:

- o Діапазон частот використовуваних інструментів (наприклад, фортепіано: 27,5 Гц - 4180 Гц, скрипка: 196 Гц - 15840 Гц).

- o Формування акордів (наприклад, мажорний акорд С: 261,63 Гц, 523,25 Гц, 830,65 Гц) [5].

- o Динаміку (наприклад, *crescendo*: поступове збільшення гучності).

- Гідролокація: Спектрограма сигналу гідролокатора може показати:

- o Відстань до об'єкта (за часом затримки сигналу).

- o Тип об'єкта (за частотним вмістом відбитого сигналу).

- o Розмір об'єкта (за силою відбитого сигналу) [11].

- Сейсмологія: Спектрограма сейсмічного запису може допомогти вченим:

- o Визначити тип сейсмічної хвилі (Р-хвиля, S-хвиля, L-хвиля).

- o Визначити глибину джерела землетрусу.

- o Оцінити магнітуду землетрусу.

- Медицина: Спектрограма серцевого шуму може допомогти лікарям:

- o Визначити тип серцевого шуму (систолічний, діастолічний).

- o Визначити причину серцевого шуму (наприклад, клапанна вада).

- o Оцінити ступінь тяжкості серцевого шуму [12].

Спектрограму можна інтерпретувати як функцію спектру часу, яка позначається як  $S(t, f)$ . Вона описує розподіл спектральної енергії сигналу  $x(t)$  в часі та частоті.

$S(t, f)$  має два виміри:

- Час ( $t$ ): Цей вимір показує, коли в сигналі відбувається певна спектральна активність.

- Частота ( $f$ ): Цей вимір показує, які частотні компоненти присутні в сигналі в даний момент часу.

Значення  $S(t, f)$  в певній точці  $(t, f)$  вказує на інтенсивність спектральних компонентів сигналу на частоті  $f$  в момент часу  $t$ . Чим вище

значення, тим більша інтенсивність сигналу на цій частоті в цей момент часу [2].

Існує декілька поширених методів для отримання спектрограм, таких як:

- Перетворення Фур'є: Це математичний метод, який розкладає сигнал на його спектральні компоненти.
- Веївлет-перетворення: Цей метод використовує локалізовані в часі функції, звані веївлетами, для аналізу сигналу.
- Короткочасне перетворення Фур'є: Цей метод розбиває сигнал на короткі інтервали часу та застосовує перетворення Фур'є до кожного інтервалу.

Вибір методу залежить від типу сигналу та цілей аналізу.

Спектрограми, як функції спектру часу, мають багато корисних властивостей:

- Візуалізація спектральної еволюції: Вони дозволяють візуалізувати, як спектральний вміст сигналу змінюється з часом [13].
- Виявлення нестационарних сигналів: Вони підходять для аналізу нестационарних сигналів, спектр яких змінюється з часом.
- Аналіз гармонійних компонентів: Вони можуть використовуватися для виявлення та аналізу гармонійних компонентів в сигналах.
- Синтез сигналів: Їх можна використовувати для синтезу сигналів з заданим спектральним вмістом [14].

Спектрограми, як функції спектру часу, є потужним інструментом для аналізу та обробки сигналів. Вони знаходять широке застосування в різних галузях, таких як аудіосистеми, телекомунікації, обробка зображень та наукові дослідження.

Важливо зазначити, що спектрограма несе ту ж інформацію, що й сам сигнал, але вона представлена в іншій формі. Це робить спектрограми

корисними для візуалізації та аналізу певних аспектів сигналу, які можуть бути не такими очевидними в часовій області.

## 1.2 Історія аналізу спектру в часі

1801 рік: Томас Юнг провів свої відомі експерименти з дифракцією та інтерференцією світла, демонструючи хвильову природу світла. Ці експерименти стали основоположними для розуміння хвильових явищ, що є важливими для спектрального аналізу.

1822 рік: Жозеф Фур'є опублікував свою працю "Аналітична теорія тепла", де він ввів поняття перетворення Фур'є. Це перетворення дозволяє розкласти будь-який періодичний сигнал на набір синусоїдальних компонентів з різними частотами та амплітудами. Фур'є показав, що навіть найскладніші функції можна представити як суму простих тригонометричних функцій. Цей принцип став основою для спектрального аналізу, дозволяючи аналізувати частотний вміст сигналів.

1920-ті роки: Поява радіотехніки та розвиток телекомунікаційних технологій стимулювали необхідність аналізу електричних сигналів. Спектральний аналіз почав широко застосовуватися для вивчення частотного складу радіосигналів. У цей час інженери використовували електронні осцилографи для візуалізації сигналів. Осцилографи дозволяли інженерам бачити хвильові форми сигналів, що було важливим для налаштування та оптимізації радіопередавачів та приймачів.

1946 рік: Деніс Габор, угорсько-британський фізик і лауреат Нобелівської премії, розробив теорію короткочасного перетворення Фур'є (STFT). Габор запропонував використовувати комплексні аналітичні функції для розкладу сигналів у часово-частотній площині. Цей підхід дозволив аналізувати сигнали, що змінюються з часом, забезпечуючи одночасний огляд як часових, так і частотних характеристик. STFT розбиває сигнал на короткі сегменти за допомогою віконної функції, після чого для кожного сегмента обчислюється перетворення Фур'є. Це дозволяє отримати часово-частотне представлення сигналу, що особливо корисно для аналізу звукових та музичних сигналів, мовлення та інших динамічних процесів.

1965 рік: Джеймс Кулі та Джон Тьюкі опублікували свою роботу, в якій представили алгоритм швидкого перетворення Фур'є (FFT). FFT значно зменшив обчислювальні витрати на виконання дискретного перетворення Фур'є (DFT), знизивши складність з  $O(N^2)$  до  $O(N \log N)$ , де  $N$  - кількість точок вибірки сигналу. Це революціонізувало обробку сигналів, зробивши можливим виконання спектрального аналізу в реальному часі на цифрових комп'ютерах. FFT швидко став стандартним інструментом у цифровій обробці сигналів, використовуючись у телекомунікаціях, аудіоінженерії, медичній діагностиці та інших галузях.

1970-ті роки: Розвиток цифрових обчислювальних технологій призвів до широкого впровадження цифрової обробки сигналів (DSP). DSP дозволила реалізувати складні алгоритми для аналізу, фільтрації та модифікації сигналів у цифровій формі. Спектрограми стали стандартним інструментом для аналізу аудіосигналів, особливо у галузі розпізнавання мовлення та музики. З'явилися спеціалізовані мікропроцесори для DSP, які забезпечили високу швидкість обробки та дозволили виконувати спектральний аналіз у реальному часі навіть на вбудованих системах.

1980-ті роки: Вейвлет-перетворення було введено як альтернатива перетворенню Фур'є для аналізу сигналів з нестабільними частотними компонентами. На відміну від перетворення Фур'є, яке використовує

синусоїдальні базові функції, вейвлет-перетворення використовує функції з обмеженою підтримкою, які можуть розтягуватися і стискатися. Це дозволяє вейвлет-перетворенню надавати одночасно високу часову та частотну роздільну здатність, що робить його особливо корисним для аналізу сигналів з швидко змінюваними частотними характеристиками, таких як електроенцефалограми (ЕЕГ) або звукові сигнали.

2000-ті роки та далі: З розвитком машинного навчання (ML) та штучного інтелекту (AI), спектрограми стали важливим інструментом для розпізнавання образів у звукових сигналах. Нейронні мережі та інші методи ML використовують спектрограми для аналізу та класифікації звукових даних. Наприклад, у системах розпізнавання мовлення спектрограми використовуються для перетворення звукових сигналів у зображення, які потім аналізуються моделями глибокого навчання. Також спектрограми використовуються в біомедичних дослідженнях для аналізу серцевих ритмів (ЕКГ), мозкової активності (ЕЕГ) та інших фізіологічних сигналів.

2010-ті роки та далі: Використання високопродуктивних обчислень (HPC) та розподілених обчислювальних систем дозволило обробляти великі обсяги даних і виконувати складний спектральний аналіз у реальному часі. Хмарні обчислення та паралельні алгоритми дозволили значно прискорити обробку сигналів, що стало важливим для таких застосувань, як моніторинг стану здоров'я пацієнтів у реальному часі, аналіз великих обсягів даних з астрономічних спостережень та інші.

### 1.3 Узагальнена конструкція спектроаналізатора

Спектроаналізатор є складним приладом, що поєднує в собі різноманітні технології та методи для точного вимірювання частотного

спектру сигналів. Від вхідного блоку до цифрового сигнального процесора, кожен компонент виконує важливу функцію для забезпечення точності та надійності аналізу. Сучасні спектроаналізатори використовуються у багатьох галузях, від телекомунікацій та радіоелектроніки до біомедичних досліджень та аудіоінженерії, забезпечуючи глибоке розуміння частотних характеристик сигналів

Узагальнена конструкція спектроаналізатора є ключовим елементом для розуміння того, як цей прилад виконує свою функцію розкладання складного сигналу на його частотні складові. Розглянемо детальніше кожен з блоків, що складають цю конструкцію.

На вході спектроаналізатора знаходиться вхідний блок, який відіграє важливу роль у підготовці сигналу до подальшої обробки. Він складається з атенюатора, який дозволяє регулювати рівень вхідного сигналу, щоб уникнути перевантаження наступних каскадів підсилення. Далі розташований вхідний підсилювач, який збільшує амплітуду слабких сигналів до рівня, достатнього для ефективної роботи наступних блоків. Останнім елементом вхідного блоку є вхідний фільтр, який виконує попереднє виділення потрібного діапазону частот та придушення небажаних позасмугових сигналів, що можуть спотворити результати аналізу.

Наступним важливим блоком є блок змішувача, який відповідає за перетворення частоти вхідного сигналу. Він складається з гетеродина, який генерує стабільний сигнал з відомою частотою, та змішувача, який комбінує сигнал гетеродина з вхідним сигналом. В результаті цього змішування утворюється сигнал проміжної частоти (ПЧ), який має фіксоване значення та є зручнішим для подальшої обробки.

Блок ПЧ продовжує обробку сигналу проміжної частоти. Він містить підсилювач ПЧ, який збільшує амплітуду сигналу до необхідного рівня, а також фільтр ПЧ, який здійснює додаткове виділення вузької смуги частот навколо ПЧ та придушення залишкових позасмугових сигналів. Останнім елементом блоку ПЧ є детектор, який виділяє інформаційний сигнал з

модульованого сигналу ПЧ. Тип детектора визначається видом модуляції сигналу, наприклад, для амплітудної модуляції використовується амплітудний детектор, а для частотної модуляції – частотний детектор.

Останнім блоком узагальненої конструкції спектроаналізатора є блок відображення, який відповідає за перетворення обробленого сигналу у форму, зручну для сприйняття людиною. Він містить аналого-цифровий перетворювач (АЦП), який перетворює аналоговий сигнал ПЧ в цифровий формат, що дозволяє проводити подальшу обробку за допомогою цифрового процесора сигналів (ЦПС). ЦПС виконує спектральний аналіз цифрового сигналу, обчислюючи амплітуди різних частотних складових. Результати цього аналізу відображаються на дисплеї у вигляді графіка спектра, таблиці значень амплітуд або іншого типу візуалізації.

Сучасні спектроаналізатори є переважно цифровими пристроями, в яких більшість функцій виконується за допомогою цифрових процесорів сигналів. Вони мають широкий діапазон частот, високу роздільну здатність, великий динамічний діапазон та різноманітні функції аналізу сигналів, що дозволяє використовувати їх у багатьох галузях науки та техніки. Деякі моделі сучасних спектроаналізаторів також оснащені додатковими інструментами, такими як генератори сигналів, векторні та логічні аналізатори, що розширює їх функціональність та робить їх незамінними приладами для інженерів та науковців (рис. 1.4).

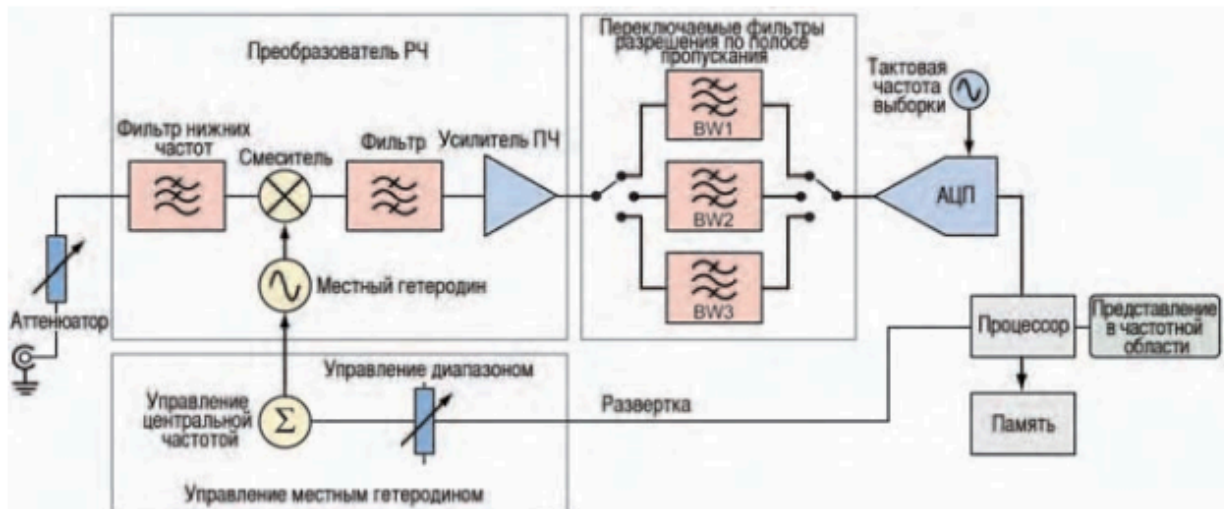


Рисунок 1.4 – Типова схема аналізатора спектру з розгорткою [15]

Розглянемо, як приклад конструкцію tinySA

TinySA – це компактний і доступний аналізатор спектра, який надає можливість вимірювати та візуалізувати характеристики радіочастотних сигналів у широкому діапазоні. Завдяки своїм невеликим розмірам та живленню від акумулятора, він ідеально підходить для використання як у лабораторних умовах, так і в польових (рис. 1.5, 1.6).

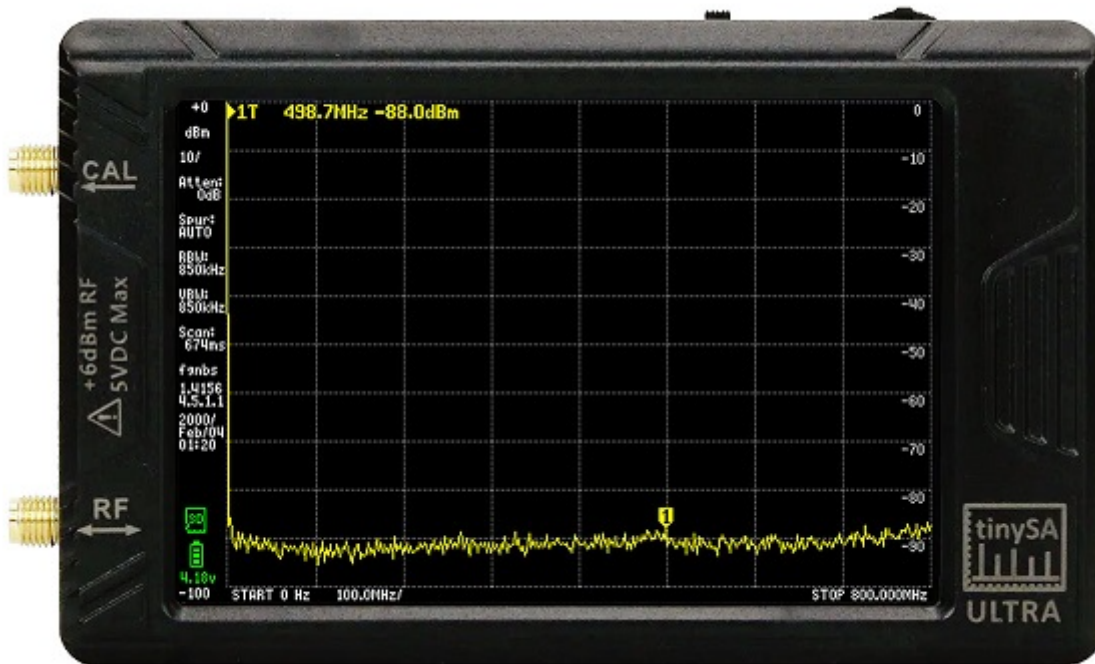


Рисунок 1.5 – Вигляд TinySA

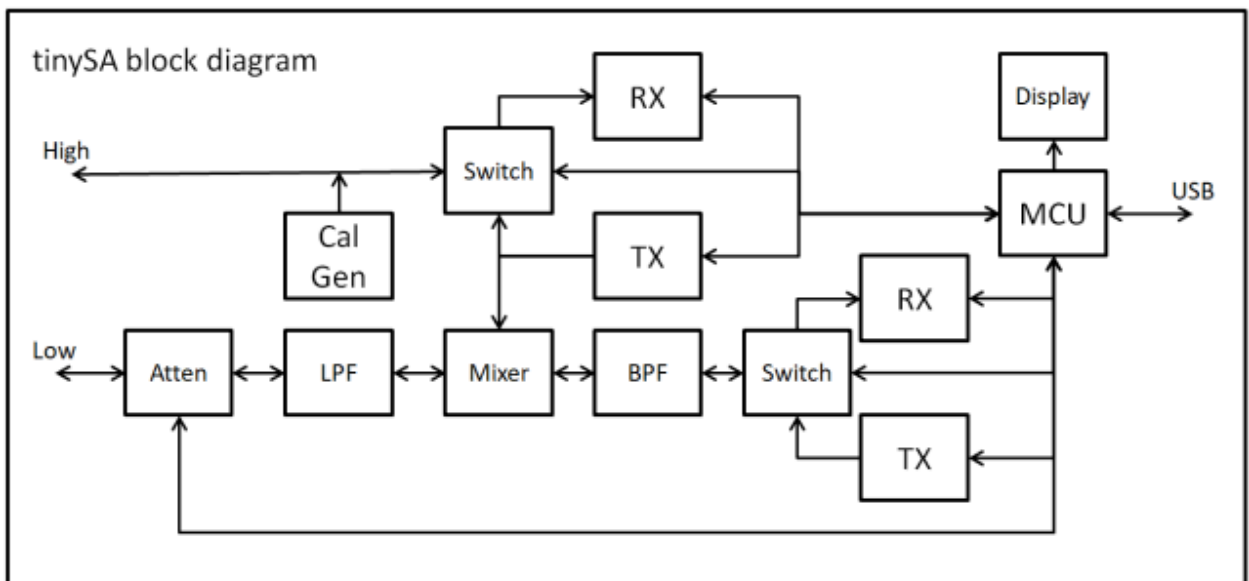


Рисунок 1.6 – Блок-схема tinySA [16]

Компоненти, що використовуються в режимі низького споживання:

У режимі низького вхідного сигналу сигнал надходить у tinySA через роз'єм низького рівня SMA.

Настроюваний аттенюатор 0-31 дБ для захисту приймача та запобігання внутрішнім гармонічним спотворенням

Фільтр низьких частот 350 МГц для усунення псевдонімів

Блок передачі, який містить гетеродин для сканування вибраного діапазону частот.

Перемикач використовується для ввімкнення виходу стеження до високого виходу, якщо він активований

Змішувач, який змішує вихідний сигнал фільтра низьких частот з гетеродином для створення високої ПЧ.

Смуговий фільтр на частоті 433,9 МГц для високої ПЧ, який усуває хвилі та очищає вихід із мікшера перед понижувальним перетворенням.

Перемикач для направлення виходу BPF на RX

І RX, що містить:

Другий гетеродин і мікшер для перетворення високої ПЧ у низьку ПЧ на 870 кГц.

Вибір роздільної здатності фільтрує від 3 кГц до 600 кГц.

Детектор потужності з динамічним діапазоном 120 дБ після фільтра роздільної здатності.

У режимі високого вхідного сигналу використовуються такі компоненти:

У режимі високого вхідного сигналу сигнал надходить у tinySA через роз'єм високого рівня SMA

Перемикач для направлення високого вхідного сигналу до блоку RX

Блок RX, що містить

Гетеродин і мікшер для перетворення вибраного частотного діапазону в низьку ПЧ на 870 кГц. Придушення дзеркала обмежено 30 дБ

Вибір роздільної здатності фільтрує від 3 кГц до 600 кГц.

Детектор потужності з динамічним діапазоном 120 дБ після фільтра роздільної здатності. Гетеродин, який робить це

## 1.4 Керування вимірюванням спектрограми

Керування вимірюванням спектрограми є критичним аспектом спектрального аналізу, що вимагає глибокого розуміння теорії та практики, а також вміння налаштовувати параметри приладу для отримання оптимальних результатів. Це включає в себе не лише вибір відповідних параметрів вимірювання, але й інтерпретацію отриманих даних з урахуванням особливостей досліджуваного сигналу та мети аналізу.

Центральна частота (Center Frequency) визначає частоту, навколо якої будується спектрограма. Вибір центральної частоти залежить від апріорних знань про досліджуваний сигнал та його спектральні характеристики.

Діапазон частот (Span) визначає ширину спектрального вікна, що відображається на спектрограмі. Відповідний вибір діапазону частот дозволяє зосередитися на дослідженні певних ділянок спектра та виявити деталі, які можуть бути втрачені при використанні широкого діапазону.

Роздільна здатність за частотою (Resolution Bandwidth, RBW) є ключовим параметром, що визначає здатність спектроаналізатора розрізняти близькі за частотою спектральні компоненти. Менша RBW забезпечує вищу роздільну здатність, але може призвести до збільшення часу вимірювання та зниження відношення сигнал/шум.

Роздільна здатність за часом (Video Bandwidth, VBW) визначає швидкість оновлення спектрограми та її здатність відображати швидкі зміни в спектрі сигналу. Вибір VBW залежить від динаміки досліджуваного сигналу та вимог до часової роздільної здатності.

Вікно (Window Function) є математичною функцією, яка застосовується до кожного часового сегмента сигналу перед виконанням перетворення Фур'є. Вибір вікна впливає на форму спектральних піків та може зменшити ефект розтікання спектра.

Тип детектора (Detector Type) визначає спосіб вимірювання амплітуди кожної частотної складової. Вибір типу детектора залежить від характеру досліджуваного сигналу та мети вимірювань. Наприклад, для вимірювання пікової потужності використовується піковий детектор, а для вимірювання середньої потужності – середньоквадратичний детектор.

Шкала амплітуд (Amplitude Scale) визначає спосіб відображення амплітуди на спектрограмі. Лінійна шкала відображає амплітуду в лінійних одиницях, тоді як логарифмічна шкала (дБ або дБм) дозволяє краще візуалізувати сигнали з великим динамічним діапазоном.

Інтерпретація спектрограми вимагає знання теорії спектрального аналізу та розуміння фізичних процесів, що лежать в основі формування спектра. Аналіз спектрограми дозволяє виявити такі характеристики сигналу, як центральна частота, ширина спектра, модуляція, наявність гармонік та інтермодуляційних спотворень, а також оцінити рівень шуму та перешкод.

Правильне керування вимірюванням спектрограми є запорукою отримання достовірних та інформативних результатів. Це вимагає від дослідника не лише знання технічних аспектів налаштування приладу, але й глибокого розуміння природи досліджуваних сигналів та процесів.

## 2 ПОБУДОВА, ТА ОБРОБКА ДАНИХ СПЕКТРОГРАМИ

### 2.1 Побудова спектрограми

Нестаціонарний сигнал - це сигнал, частотний склад якого змінюється з часом. Спектрограма нестаціонарного сигналу є оцінкою часової еволюції його частотного складу. Для побудови спектрограми нестаціонарного сигналу потрібно виконати такі дії:

Розділити сигнал на відрізки рівної довжини. Сегменти повинні бути достатньо короткими, щоб частотний склад сигналу не змінювався помітно в межах сегмента. Сегменти можуть перекриватися, а можуть і не перекриватися.

Застосувати віконну функцію до кожного сегменту і обчисліть його спектр, щоб отримати швидке перетворення Фур'є.

Відобразити для кожного сегмента потужність спектра в децибелах. Зобразити величини поруч у вигляді зображення із залежною від величини кольоровою картою.

При побудові спектрограми, сигнал розділяють на коротші частини, відомі як сегменти або вікна. Це дозволяє аналізувати частотний зміст сигналу у різні моменти часу, що важливо для сигналів, які змінюються з часом.

Вибір довжини сегменту залежить від природи сигналу та потрібної часово-частотної роздільної здатності. Короткі сегменти забезпечують кращу часову роздільну здатність, але знижують частотну роздільну здатність, і навпаки.

Сегменти зазвичай множать на віконну функцію (наприклад, Ганн, Геммінг або прямокутне вікно), що згладжує краї сегменту та зменшує ефекти витікання спектра.

Для зменшення втрат інформації при сегментації сигналу, використовують перекриття сегментів. Це означає, що наступний сегмент починається до

завершення попереднього сегменту. Перекриття дозволяє краще відстежувати зміни у частотному змісті сигналу.

Типове перекриття становить 50% або 75%, але може варіюватися залежно від потреб аналізу. Наприклад, при 50% перекритті кожен новий сегмент починається з середини попереднього сегменту.

Переваги перекриття:

Збільшує плавність переходу між сегментами.

Зменшує ефект розривів, що виникають на межах сегментів.

Після розділення сигналу на сегменти та перекриття, кожен сегмент аналізують у часовій області для побудови спектрограми. Вирівнювання сегментів у часі означає правильне розміщення спектральних даних кожного сегменту на часовій шкалі.

Для кожного сегменту застосовують швидке перетворення Фур'є (FFT), отримуючи спектральні компоненти цього сегменту.

Спектральні дані кожного сегменту відображаються у відповідний часовий інтервал на спектрограмі. Наприклад, якщо сегменти мають перекриття 50%, то кожен новий сегмент буде розміщений на половину довжини сегменту вперед від попереднього (рис. 2.1).

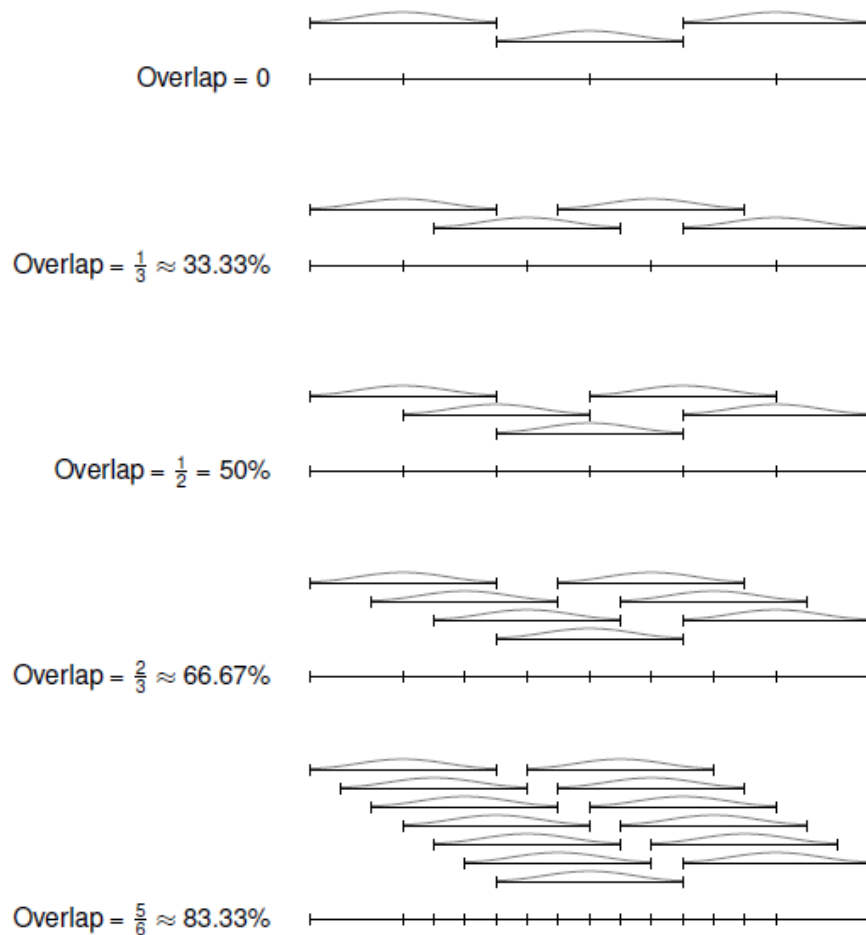


Рисунок 2.1 – Перекриття сегментів [17]

## 2.2 Побудова Скалограми

Скалограма, як абсолютне значення безперервного вейвлет-перетворення (CWT) сигналу, є потужним інструментом візуалізації та аналізу сигналів у часово-частотній площині. Вона відображає розподіл енергії сигналу за частотами в залежності від часу, надаючи детальну інформацію про локальні особливості сигналу та його еволюцію.

На відміну від спектрограми, яка базується на швидкому перетворенні Фур'є (ШПФ) та має фіксовану роздільну здатність за частотою та часом, скалограма використовує вейвлети – математичні функції, що локалізовані як

у часі, так і за частотою. Ця властивість вейвлетів дозволяє скалограмі адаптувати свою роздільну здатність до різних частот: висока роздільна здатність для високих частот, де важливі швидкі зміни, та низька роздільна здатність для низьких частот, де важливі повільні зміни.

Завдяки цій адаптивності скалограма є особливо корисною для аналізу сигналів реального світу, які часто мають складну структуру та містять події різних масштабів. Наприклад, мовленнєвий сигнал містить як швидкі зміни, пов'язані з вимовою окремих звуків, так і повільні зміни, пов'язані з інтонацією та ритмом мовлення. Скалограма дозволяє побачити обидва ці типи змін на одному графіку, надаючи більш повну картину структури сигналу.

Крім того, скалограма може бути використана для виявлення та локалізації різких переходів у сигналах, таких як імпульси, стрибки та розриви. Ці переходи можуть бути пов'язані з різними подіями, такими як початок або кінець звуку, зміна частоти сигналу або поява шуму. Скалограма дозволяє точно визначити час та частоту цих переходів, що може бути важливим для розуміння природи сигналу та його джерела.

Скалограма знаходить широке застосування в різних галузях науки та техніки. Вона використовується для аналізу звукових сигналів у музиці, акустиці та розпізнаванні мовлення, для обробки зображень у медицині та дефектоскопії, для аналізу сейсмічних даних у геофізиці, для вивчення сигналів мозку в нейронауках та для багатьох інших завдань.

Завдяки своїй здатності адаптувати роздільну здатність до різних частот та виявляти локальні особливості сигналу, скалограма є потужним інструментом для дослідників та інженерів, які працюють з сигналами реального світу. Вона дозволяє отримати більш глибоке розуміння структури та динаміки сигналів, що може бути використано для розробки нових методів обробки сигналів, діагностики та прогнозування.

Безперервне вейвлет-перетворення (CWT) є математичним інструментом, який розкладає сигнал на вейвлети, що локалізовані як у часі,

так і за частотою. На відміну від дискретного вейвлет-перетворення (DWT), яке працює з дискретними масштабами та зсувами, CWT використовує неперервні параметри масштабування та зсуву. Це дозволяє отримати більш детальне уявлення про часово-частотний вміст сигналу, але за рахунок збільшення обчислювальної складності.

CWT обчислюється шляхом згортки сигналу з масштабованими та зміщеними версіями материнського вейвлета. Материнський вейвлет - це функція, яка задовольняє певним умовам, таким як обмеженість за часом та нульове середнє значення. Вибір материнського вейвлета залежить від конкретного завдання та характеристик сигналу, який аналізується.

Вейвлети Морзе - це сімейство вейвлетів, які мають форму імпульсів з експоненційно затухаючими коливаннями. Вони названі на честь американського фізика та винахідника Семюеля Морзе, який розробив код Морзе для передачі телеграфних повідомлень. Вейвлети Морзе мають параметри, які контролюють їх симетричність та гладкість, що дозволяє підібрати оптимальний вейвлет для конкретного завдання.

Вейвлети Морзе мають ряд переваг порівняно з іншими типами вейвлетів. Вони можуть бути налаштовані для аналізу сигналів з різними характеристиками, такими як гладкість, частотний вміст та наявність імпульсів. Також, вони добре локалізовані як у часі, так і за частотою, що дозволяє виявляти локальні особливості сигналу. Вейвлети Морзе мають відносно простий математичний опис, що полегшує їх використання та аналіз.

Застосування вейвлетів Морзе:

В обробці сигналів Вейвлети Морзе використовуються для стиснення даних, шумозаглушення, виявлення особливостей сигналу та інших завдань.

Також, Вейвлети Морзе застосовуються для стиснення зображень, виявлення країв, сегментації зображень та інших завдань комп'ютерного зору.

У медицині Вейвлети Морзе використовуються для аналізу біомедичних сигналів, таких як ЕЕГ та ЕКГ, а також для обробки медичних зображень.

У геофізиці Вейвлети Морзе застосовуються для аналізу сейсмічних даних, виявлення геологічних структур та прогнозування землетрусів.

При побудові скалограми з використанням вейвлетів Морзе, сигнал розкладається на вейвлети Морзе з різними масштабами та зсувами. Абсолютне значення коефіцієнтів вейвлет-перетворення відображається на графіку як функція часу та частоти. Це дозволяє отримати детальну картину часово-частотної структури сигналу, включаючи локальні особливості, переходи та інші важливі характеристики.

Використання вейвлетів Морзе для побудови скалограми дозволяє отримати більш інформативне та адаптивне представлення сигналу порівняно зі спектрограмою, що базується на ШПФ. Це робить скалограму з вейвлетами Морзе потужним інструментом для аналізу сигналів у різних областях науки та техніки.

### 2.3 Фільтрація, віконні фільтри

Обробка даних спектрограми відіграє вирішальну роль в аналізі та інтерпретації складних сигналів у різних областях, таких як обробка звуку, розпізнавання мови та аналіз вібрації. Заглибимося в ключові аспекти обробки даних спектрограми, зосередивши увагу на методах фільтрації та віконних фільтрах (таб. 2.1).

Фільтрація є фундаментальною операцією в аналізі спектрограм, що дозволяє дослідникам отримувати відповідну інформацію із сигналів шляхом видалення небажаних шумів і перешкод [18]. Віконні фільтри, з іншого боку, відіграють значну роль у формуванні спектрального вмісту сигналу під час процесу аналізу. Глибоко досліджуючи ці концепції, ми прагнемо забезпечити

повне розуміння складних процесів, пов'язаних з обробкою даних спектрограм.

Таблиця 2.1 – Ключові аспекти обробки даних спектрограми: методи фільтрації та віконні фільтри [3], [5], [19]

Аспект	Опис	Приклади методів
Фільтрація:	Використовується для видалення небажаних компонентів з даних спектрограми, таких як шум або артефакти.	- Фільтр ковзаючого середнього: Цей метод використовує середнє значення сусідніх точок даних для згладжування спектру.
		Медіанний фільтр: Цей метод використовує медіану сусідніх точок даних для згладжування спектру, роблячи його більш стійким до викидів
		Частотна фільтрація: Цей метод використовується для видалення небажаних частот з спектру, таких як шум мережі або гармонічні спотворення.
Віконні фільтри:	Використовуються для аналізу локальних характеристик спектру.	- Прямокутний вікно: Це найпростіше вікно, яке дає однакове значення всім точкам даних у вікні.
		Гауссове вікно: Це вікно має дзвоноподібну форму, яка дає більшу вагу точкам даних в центрі вікна
		Хеммінгове вікно: Це вікно має форму косинуса, яка дає нульове значення на краях вікна, що може допомогти зменшити артефакти накладання.

Фільтрація є важливим кроком в обробці даних спектрограми, оскільки вона допомагає виділити конкретні частотні компоненти сигналу, послаблюючи інші. Фільтри, які зазвичай використовуються в аналізі спектрограм, включають фільтри низьких частот, фільтри високих частот, смугові фільтри та смугові фільтри. Типи фільтрів:

- Фільтри низьких частот (ФНЧ): Ці фільтри пропускають низькочастотні компоненти сигналу та послаблюють високочастотні компоненти [5].
- Фільтри високих частот (ФВЧ): Ці фільтри пропускають високочастотні компоненти сигналу та послаблюють низькочастотні компоненти.
- Смугові фільтри: Ці фільтри пропускають компоненти сигналу в заданому діапазоні частот і послаблюють компоненти за його межами [4].

- **Смугові фільтри:** Ці фільтри пропускають компоненти сигналу за межами заданого діапазону частот і послаблюють компоненти в ньому.

Серед них фільтри низьких частот особливо важливі для видалення високочастотного шуму та артефактів із сигналу, тим самим підвищуючи чіткість спектрограми. Вибірково послаблюючи частоти вище певної точки зрізу, фільтри низьких частот допомагають зосередитися на основних компонентах сигналу, полегшуючи його аналіз та інтерпретацію (рис. 2.2).

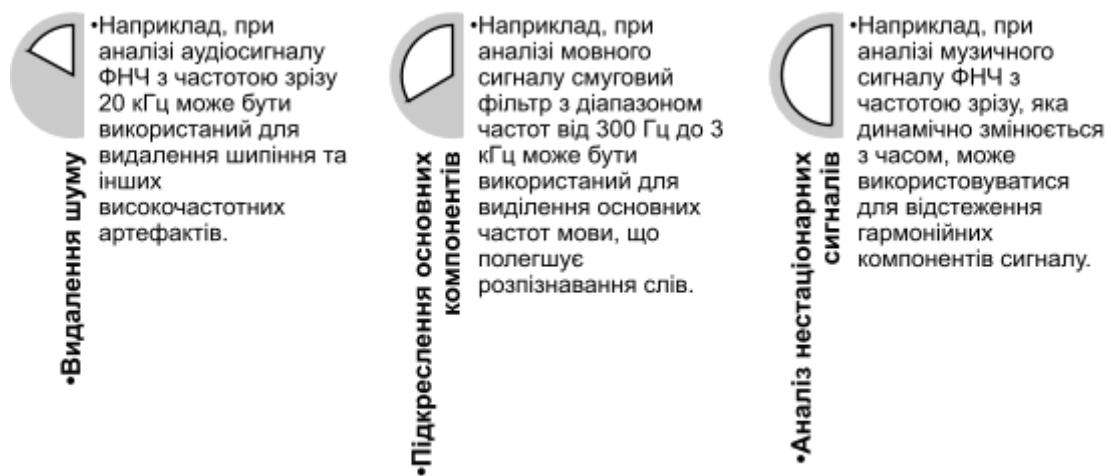


Рисунок 2.2 – Фільтрація даних спектрограми [20], [21]

Наведемо поширенні приклади:

**ФНЧ:** Припустимо, що сигнал має спектр, який охоплює діапазон частот від 0 Гц до 20 кГц. Використання ФНЧ з частотою зрізу 10 кГц дозволить пропустити компоненти сигналу в діапазоні від 0 Гц до 10 кГц і послабити компоненти в діапазоні від 10 кГц до 20 кГц.

**Смуговий фільтр:** Припустимо, що сигнал має спектр, який охоплює діапазон частот від 200 Гц до 2 кГц. Використання смугового фільтра з діапазоном частот від 500 Гц до 1 кГц дозволить пропустити компоненти сигналу в діапазоні від 500 Гц до 1 кГц і послабити компоненти за його межами [12].

Віконні фільтри є важливими інструментами для аналізу спектрограм, що дозволяє дослідникам застосовувати вагові функції до сигналу перед виконанням перетворення Фур'є [22]. Ці віконні функції допомагають зменшити спектральний витік і рівні бічних пелюсток, тим самим покращуючи частотну роздільну здатність спектрограми.

Зазвичай використовувані віконні функції включають прямокутне вікно, вікно Хеннінга, вікно Хеммінга, вікно Бартлета та вікно Блекмана.

Прямокутне вікно є найпростішим типом віконної функції, де всі відліки в межах вікна мають однакову вагу (амплітуду), рівну 1. Це означає, що кожен відлік сигналу в межах вікна враховується з однаковою важливістю при обчисленні спектра.

$$w(n) = 1, \text{ для } 0 \leq n \leq N - 1$$

де:

$w(n)$  - значення віконної функції для  $n$ -го відліку

$N$  - довжина вікна

Прямокутне вікно має вузьку головну пелюстку у своєму частотному спектрі, що забезпечує високу роздільну здатність за частотою. Однак, воно також має високі бічні пелюстки, що може призвести до спектральних витоків та появи артефактів у спектрограмі.

Найчастіше використовується в ситуаціях, коли важлива висока роздільна здатність за частотою, наприклад, при аналізі сигналів з вузькосмуговими компонентами. Однак, через високі бічні пелюстки, воно може бути не найкращим вибором для аналізу сигналів з широким спектром або сигналів, що містять слабкі компоненти поряд із сильними.

Вікно Хеннінга є згладженою версією прямокутного вікна, де відліки в межах вікна мають плавно змінну вагу. Це дозволяє зменшити спектральні витоків та отримати більш гладку спектрограму.

$$w(n) = 0.5 * (1 - \cos(2\pi n/(N - 1))), \text{ для } 0 \leq n \leq N - 1$$

Воно має ширшу головну пелюстку та нижчі бічні пелюстки порівняно з прямокутним вікном. Це зменшує спектральні витоки, але дещо знижує роздільну здатність за частотою.

Вікно Хеннінга є популярним вибором для загальних завдань спектрального аналізу, де потрібен компроміс між роздільною здатністю за частотою та придушенням спектральних витоків. Воно часто використовується для аналізу мовлення, аудіо та інших сигналів з широким спектром.

Вікно Хеммінга є модифікацією вікна Хеннінга, яка має ще більш плавну форму та забезпечує ще краще придушення спектральних витоків.

$$w(n) = 0.54 - 0.46 * \cos(2\pi n/(N - 1)), \text{ для } 0 \leq n \leq N - 1$$

Вікно Хеммінга має ширшу головну пелюстку та нижчі бічні пелюстки порівняно з вікном Хеннінга. Це забезпечує ще краще придушення спектральних витоків, але дещо знижує роздільну здатність за частотою.

Часто використовується в аудіо та акустиці, де важливо мінімізувати спектральні витоки та отримати точну оцінку амплітуд спектральних компонентів.

Вікно Бартлетта має лінійно спадну форму від центру до країв вікна. Це означає, що відліки в центрі вікна мають максимальну вагу, а відліки на краях вікна мають мінімальну вагу.

$$w(n) = 1 - 2|n - (N - 1)/2|/(N - 1), \text{ для } 0 \leq n \leq N - 1$$

Вікно Бартлетта має досить широку головну пелюстку та бічні пелюстки, що спадають відносно повільно. Це може призводити до розмиття спектральних піків та появи артефактів у спектрограмі.

Воно досить рідко використовується в спектральному аналізі через його недоліки. Однак, воно може бути корисним у деяких спеціальних випадках, наприклад, при аналізі сигналів з різкими переходами, де важливо зберегти форму імпульсів.

Вікно Блекмана є більш складною віконною функцією, яка має три параметри, що контролюють його форму. Зазвичай використовується вікно Блекмана з параметрами  $a_0=0.42$ ,  $a_1=0.5$ ,  $a_2=0.08$ .

$$w(n) = a_0 - a_1 * \cos(2\pi n / (N - 1)) + a_2 * \cos(4\pi n / (N - 1)), \text{ для } 0 \leq n \leq N-1$$

Вікно Блекмана має дуже низькі бічні пелюстки, що дозволяє виявляти слабкі сигнали поряд із сильними. Однак, воно має ширшу головну пелюстку порівняно з іншими вікнами, що може призводити до деякого зменшення роздільної здатності за частотою.

Його часто використовується в спектральному аналізі, де важливо мінімізувати спектральні витоки та отримати точну оцінку амплітуд спектральних компонентів.

Вибір оптимального вікна залежить від конкретного завдання та вимог до спектрального аналізу. Кожна з функцій має свої переваги та недоліки.

Прямокутне вікно має найкращу роздільну здатність за частотою, але найбільші спектральні витоки. Підходить для аналізу сигналів з вузькими спектральними піками, де важлива точна локалізація частоти.

Вікно Хеннінга забезпечує компроміс між роздільною здатністю та спектральними витоками. Є гарним вибором для загальних завдань спектрального аналізу.

Вікно Хеммінга: має ще менші спектральні витоки, ніж вікно Хеннінга, але трохи гіршу роздільну здатність. Добре підходить для аналізу

аудіосигналів та інших сигналів з широким спектром, де важливо мінімізувати витоки.

Вікно Бартлетта має найгіршу роздільну здатність та помірні спектральні витоки. Може бути корисним для аналізу сигналів з різкими переходами, але рідко використовується на практиці.

Вікно Блекмана має найкраще придушення спектральних витоків, але найгіршу роздільну здатність. Підходить для аналізу сигналів зі слабкими компонентами, які можуть бути масковані сильними компонентами через спектральні витоки.

## 2.4 Нормалізація та оцінка рівня завад

Обробка даних спектрограми відіграє вирішальну роль у різних сферах, таких як обробка сигналів, розпізнавання мови та моніторинг навколишнього середовища. Нормалізація даних спектрограми та оцінка рівнів перешкод є важливими кроками для забезпечення точного аналізу та інтерпретації даних. Заглибимось в тонкощі обробки даних спектрограми, зосередившись на використовуваних методах нормалізації та методах оцінки рівнів перешкод.

Нормалізація даних спектрограми є життєво важливим кроком у стандартизації даних для аналізу. Нормалізація передбачає коригування діапазону значень на спектрограмі до загальної шкали, гарантуючи, що всі точки даних обробляються однаково.

Існує декілька методів нормалізації даних спектрограм, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Деякі з найпоширеніших методів включають:

- **Мінімально-максимальне масштабування:** Цей метод масштабує дані до діапазону від 0 до 1, віднімаючи мінімальне значення від кожного

значення даних і потім ділячи результат на різницю між максимальним і мінімальним значеннями [18].

- Стандартизація: Цей метод масштабує дані до середнього значення 0 та стандартного відхилення 1, віднімаючи середнє значення від кожного значення даних і потім ділячи результат на стандартне відхилення.

- Декададне логарифмування: Цей метод перетворює всі значення даних в логарифмічні значення, що може бути корисним для даних, які мають широкий динамічний діапазон [22].

Цей процес має важливе значення для усунення зміщень, викликаних відмінностями в потужності сигналу або умовах запису, що дозволяє чесно порівнювати різні набори даних. Загальні методи нормалізації, що використовуються в аналізі спектрограм, включають мінімально-максимальне масштабування, нормалізацію z-показника та надійне масштабування. Ці методи допомагають привести дані до загального масштабу, не спотворюючи основні шаблони, присутні в спектрограмі, наприклад:

- Мінімально-максимальне масштабування: Припустимо, що спектр сигналу має мінімальне значення 0 і максимальне значення 100. Використання мінімально-максимального масштабування призведе до того, що всі значення на спектрограмі будуть знаходитися в діапазоні від 0 до 1 [10].

- Стандартизація: Припустимо, що спектр сигналу має середнє значення 50 і стандартне відхилення 10. Використання стандартизації призведе до того, що всі значення на спектрограмі будуть мати середнє значення 0 і стандартне відхилення 1.

- Декададне логарифмування: Припустимо, що спектр сигналу має значення від 1 до 1000. Використання декадного логарифмування призведе до того, що всі значення на спектрограмі будуть знаходитися в діапазоні від 0 до 3.

Оцінка рівнів перешкод у даних спектрограми має вирішальне значення для виявлення та пом'якшення будь-яких небажаних сигналів, які можуть вплинути на аналіз (таб. 2.2).

Таблиця 2.2 – Оцінка рівнів перешкод у даних спектрограми [23, 24]

Метод	Опис	Приклад
Візуальний огляд:	Перевірка спектрограми на наявність аномалій, таких як спайки або нерегулярні візерунки.	- Спайки на спектрограмі можуть вказувати на імпульсні перешкоди.
		Нерегулярні візерунки можуть вказувати на шуми з навколишнього середовища.
Співвідношення сигнал/шум (SNR):	Розрахунок співвідношення потужності сигналу до потужності шуму.	- SNR 10 дБ вказує, що потужність сигналу в 10 разів більша за потужність шуму.
		SNR 20 дБ вказує, що потужність сигналу в 100 разів більша за потужність шуму.
Спектральний аналіз:	Аналіз розподілу потужності сигналу та шуму по частотах.	- Наявність піків у спектрі, що не відповідають очікуваному сигналу, може вказувати на перешкоди.
		Ширококутовий шум може бути візуально представлений у вигляді рівної лінії на спектрі.

Методи оцінки перешкод включають візуальний огляд спектрограми на наявність аномалій, таких як спайки або нерегулярні візерунки, які відхиляються від очікуваного сигналу. Крім того, такі методи кількісного аналізу, як обчислення співвідношення сигнал/шум і спектральний аналіз, можуть надати уявлення про рівень перешкод, присутніх у даних. Поєднуючи візуальний і кількісний підходи, аналітики можуть отримати повне розуміння рівнів перешкод і вжити відповідних заходів для їх усунення.

Незважаючи на прогрес в обробці даних спектрограм, залишається кілька проблем з точним аналізом та інтерпретацією даних (рис. 2.3).

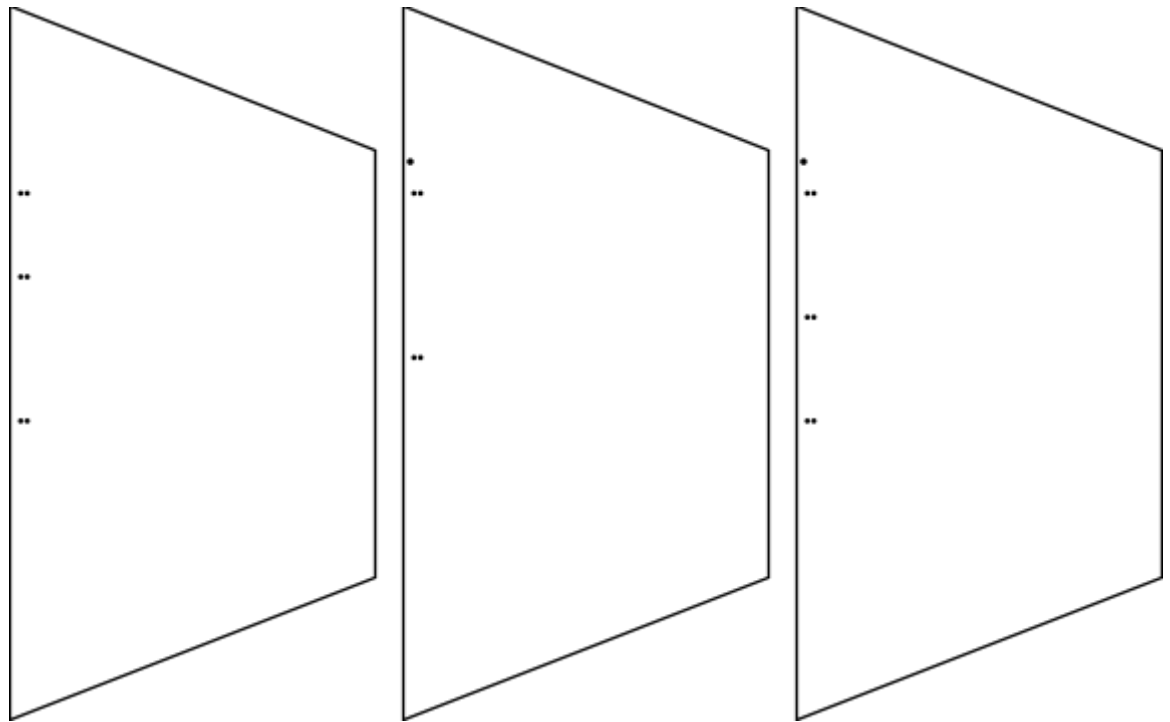


Рисунок 2.3 – Проблеми та виклики в обробці даних спектрограм [7, 21, 25]

Змінність рівнів шуму в різних записах може вплинути на точність аналізу, що призведе до потенційних помилок у інтерпретації результатів. Розрізнення між бажаним сигналом і перешкодами створює іншу проблему, особливо в складних наборах даних із частотними компонентами, що перекриваються. Вирішення цих проблем вимагає розробки передових алгоритмів, які можуть точно розрізняти сигнал і перешкоди, підвищуючи точність і надійність аналізу даних спектрограм.

Підсумовуючи, обробка даних спектрограм включає методи нормалізації для стандартизації даних та оцінки рівнів перешкод для забезпечення точності даних. Застосовуючи загальні методи нормалізації та комбінацію методів візуальної та кількісної оцінки перешкод, аналітики можуть ефективно аналізувати дані спектрограм. Незважаючи на проблеми, пов'язані з мінливістю шуму та перешкодами сигналу, розробка вдосконалених алгоритмів є перспективною для подолання цих перешкод і підвищення точності аналізу даних спектрограм.

## 2.5 Вейвлет та інші перетворення

Обробка даних спектрограми відіграє вирішальну роль у різних сферах, таких як обробка сигналів, розпізнавання мови та моніторинг навколишнього середовища. Серед різноманітних методів, що використовуються в обробці даних спектрограми, вейвлет-перетворення привернуло значну увагу через свою ефективність у вилученні відповідної інформації зі складних наборів даних. Заглибимося в сферу обробки даних спектрограм, зосередившись на вейвлет-перетворенні та інших поширених перетвореннях, які використовуються в цій галузі. Ми також вивчимо переваги вейвлет-перетворення, порівняємо його з іншими перетвореннями та обговоримо проблеми та обмеження, з якими стикаємося при обробці даних спектрограм.

Вейвлет-перетворення є потужним інструментом, який використовується для аналізу даних спектрограм. На відміну від традиційного перетворення Фур'є, яке надає частотну інформацію, але не має часової локалізації, вейвлет-перетворення пропонує як часову, так і частотну локалізацію [18]. ВП використовує набір функцій, званих вейвлетами, для аналізу сигналу. Вейвлети - це локалізовані за часом функції, які можуть бути масштабовані та переміщувані по сигналу. Кожна вейвлет-функція має певну частоту та часову локалізацію, що дозволяє їй ефективно захоплювати певні компоненти сигналу.

Математично вейвлет-перетворення сигналу  $x(t)$  визначається інтегралом:

$$W(a, b) = \int [x(t) * \psi * ((t - b) / a)] dt, \quad -\infty < t < \infty$$

Де:

$W(a, b)$  — вейвлет-коефіцієнти,

$x(t)$  — сигнал у часовій області,

$\psi(t)$  — материнський вейвлет,

$a$  — масштабний коефіцієнт (визначає частоту),

$b$  — коефіцієнт зсуву (визначає час).

Існують два основних типи вейвлет-перетворення: неперервне (CWT) та дискретне (DWT). CWT забезпечує високу роздільну здатність за частотою, але низьку за часом, тоді як DWT забезпечує компроміс між частотною та часовою роздільною здатністю.

У контексті обробки даних спектрограм вейвлет-перетворення дозволяє дослідникам аналізувати складні сигнали з високою частотно-часовою роздільною здатністю. Наприклад, у програмах розпізнавання мовлення вейвлет-перетворення може допомогти ідентифікувати певні фонетичні елементи в мовному сигналі. Здатність локалізувати часові та частотні компоненти робить вейвлет-перетворення універсальним інструментом для аналізу даних спектрограми.

Переваги використання вейвлет-перетворення в обробці даних спектрограми включають його ефективність у обробці нестационарних сигналів, таких як сигнали зі змінними в часі частотами:

- Часово-частотна локалізація: ВП може відображати як частотний, так і часовий вміст сигналу, що робить його ідеальним для аналізу нестационарних сигналів [42].
- Виявлення локальних подій: ВП може ефективно виявляти локальні події в сигналі, такі як транзйенти та змінні частотні компоненти.
- Стиснення даних: ВП може використовуватися для стиснення даних спектрограм, зберігаючи при цьому важливу інформацію [26].

Перетворення Фур'є відоме своєю точністю в аналізі частотної області, але може не мати часової локалізації порівняно з вейвлет-перетворенням [8].

Порівнюючи різні перетворення, дослідники часто розглядають компроміс між точністю та обчислювальною ефективністю. Наприклад, перетворення Фур'є може бути кращим для додатків, де точна інформація про частоту є вирішальною, тоді як вейвлет-перетворення вибирається через його можливості частотно-часової локалізації.

Вибір методу перетворення при обробці даних спектрограм залежить від природи даних і конкретних цілей дослідження. Наприклад, у музичному аналізі перетворення Фур'є може бути використане для виділення основних частот музичних нот, тоді як вейвлет-перетворення може бути застосоване для виявлення часових змін у музичному сигналі [27].

Швидке перетворення Фур'є (ШПФ) є обчислювальним алгоритмом, який революціонізував цифрову обробку сигналів, надаючи можливість ефективно обчислювати дискретне перетворення Фур'є (ДПФ). ДПФ розкладає дискретний сигнал на сукупність комплексних експонент з різними частотами та амплітудами, забезпечуючи перехід від часового представлення сигналу до його частотного спектру.

Основою ШПФ є розбиття вихідного ДПФ на менші ДПФ, використовуючи властивості симетрії та періодичності комплексних експонент. Найбільш відомим алгоритмом ШПФ є алгоритм Кулі-Тьюкі, який рекурсивно розбиває ДПФ на два ДПФ половинної довжини. Цей підхід дозволяє зменшити обчислювальну складність з  $O(N^2)$  для прямого обчислення ДПФ до  $O(N \log N)$  для ШПФ, де  $N$  — кількість відліків сигналу. Це суттєве зменшення обчислювальної складності робить ШПФ практично застосовним для аналізу великих обсягів даних у реальному часі. Існують різні варіанти алгоритму Кулі-Тьюкі, які оптимізовані для різних типів даних та апаратних платформ. Наприклад, алгоритм ШПФ з прорідженням за часом (decimation-in-time FFT) та алгоритм ШПФ з прорідженням за частотою (decimation-in-frequency FFT) використовують різні стратегії розбиття ДПФ, але досягають тієї ж обчислювальної ефективності.

FFTW (Fastest Fourier Transform in the West) - це видатна бібліотека з відкритим вихідним кодом, розроблена в Массачусетському технологічному інституті (MIT). Її основна мета - забезпечити найшвидші та найефективніші реалізації швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) для різноманітних розмірностей та типів даних. FFTW є незамінним інструментом для багатьох наукових, інженерних та обчислювальних задач, де потрібна обробка сигналів та аналіз частотних характеристик.

Однією з ключових особливостей, що виділяє FFTW серед інших бібліотек ШПФ, є її здатність використовувати так звані Wisdom конфігурації. Wisdom - це набір параметрів, що описує оптимальний алгоритм ШПФ для конкретного розміру вхідних даних та їх типу. Ці конфігурації створюються автоматично шляхом виконання серії тестових ШПФ з різними параметрами та вибором найшвидшого алгоритму для даної задачі.

Використання Wisdom конфігурацій надає ряд переваг. По-перше, це суттєво підвищує швидкість обчислень, оскільки FFTW може вибрати найефективніший алгоритм для кожного конкретного випадку. По-друге, це зменшує час, необхідний для налаштування ШПФ, оскільки користувачеві не потрібно вручну підбирати оптимальні параметри. По-третє, це покращує переносимість обчислень, оскільки Wisdom конфігурації можуть бути збережені у файлі та використані на інших комп'ютерах з аналогічною архітектурою.

FFTW надає зручні функції для створення, збереження та завантаження Wisdom конфігурацій. Процес створення такої конфігурації включає в себе виконання серії тестових ШПФ з різними параметрами та вибір найшвидшого з них. Отриманий набір параметрів зберігається у файлі з розширенням ".wis", який можна потім використовувати для прискорення обчислень ШПФ у майбутніх задачах.

Для використання Wisdom конфігурації, її необхідно завантажити з файлу перед виконанням ШПФ. FFTW надає функцію `fftw_import_wisdom_from_filename`, яка дозволяє зчитати конфігурацію з

файлу та застосувати її до плану ШПФ. Після цього можна викликати функцію `fftw_plan_dft_1d` або іншу відповідну функцію для створення плану ШПФ з використанням завантаженої Wisdom конфігурації.

Важливо зазначити, що Wisdom конфігурації є специфічними для конкретного розміру та типу даних. Тому, якщо розмір або тип даних змінюються, необхідно створити нову Wisdom конфігурацію або використовувати інший метод налаштування параметрів ШПФ.

Таким чином, FFTW та Wisdom конфігурації є потужним інструментом для оптимізації та прискорення обчислень ШПФ. Вони дозволяють досягти високої продуктивності та ефективності при обробці сигналів та аналізі частотних характеристик у різних галузях науки та техніки [28].

Підсумовуючи, обробка даних спектрограм передбачає застосування різних методів перетворення, причому вейвлет-перетворення виділяється своїми можливостями частотно-часової локалізації. Порівнюючи різні перетворення та розуміючи їхні переваги та обмеження, дослідники можуть приймати обґрунтовані рішення щодо найбільш підходящого методу для потреб аналізу даних спектрограм. Подолання таких проблем, як зменшення шуму та обробка артефактів, прокладе шлях до прогресу в обробці даних спектрограм, що призведе до більш точних і надійних результатів у різних програмах.

## 2.6 Трекінг спектру передавача

Обробка даних спектрограми відіграє вирішальну роль в аналізі та відстеженні спектрів передавача в різних системах зв'язку. Заглибимось в сферу методів обробки даних спектрограм, зосереджуючись на методах

обробки сигналів, алгоритмах відстеження спектру передавача, проблемах впровадження та майбутніх напрямках.

Обробка даних спектрограми передбачає аналіз сигналів у частотно-часовій області, що дозволяє детально досліджувати характеристики сигналу в часі. Методи частотно-часового аналізу, такі як короткочасне перетворення Фур'є (STFT) і безперервне вейвлетне перетворення (CWT), зазвичай використовуються в обробці даних спектрограм (таб. 2.3).

Таблиця 2.3 – Обробка даних спектрограми: методи частотно-часового аналізу [3, 5]

Метод	Опис	Приклад
Короткочасне перетворення Фур'є (STFT)	Розбиває сигнал на короткі вікна, обчислює перетворення Фур'є для кожного вікна та відображає результати у вигляді спектрограми.	Аналіз динаміки частотного вмісту мовного сигналу з часом.
Безперервне вейвлетне перетворення (CWT)	Розбиває сигнал на вейвлети, обчислює скалярний добуток сигналу з кожним вейвлетом та відображає результати у вигляді спектрограми.	Аналіз локальних частотних компонентів у музичному сигналі.

STFT розбиває сигнал на частотні компоненти протягом коротких інтервалів часу, надаючи розуміння варіацій сигналу з високою тимчасовою роздільною здатністю. З іншого боку, CWT пропонує більш гнучкий підхід, аналізуючи сигнали в різних масштабах, що робить його придатним для нестационарних сигналів із змінним частотним вмістом. Ці методи дозволяють дослідникам отримувати цінну інформацію з даних спектрограми та полегшують точне відстеження спектру передавача.

У сфері відстеження спектру передавача адаптивні алгоритми відіграють ключову роль у динамічному моніторингу та пристосуванні до

спектральних змін [6]. Алгоритм рекурсивних найменших квадратів (RLS) є одним із таких методів, який постійно оновлює свої параметри на основі найновіших даних, що робить його добре придатним для відстеження змінних у часі спектрів у даних спектрограм. Крім того, для відстеження спектру передавача в даних спектрограми використовується фільтрація Калмана, рекурсивний алгоритм, який оцінює стан лінійної динамічної системи на основі серії шумових вимірювань [6]. Ці алгоритми підвищують точність і ефективність відстеження спектру, забезпечуючи оптимальну продуктивність у системах зв'язку, де спектральний моніторинг є критичним для цілісності сигналу (рис. 2.4).

<p><b>• Приклад 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>•• Задача:</b> Відстеження спектру мовного сигналу з часом.</li> <li><b>•• Метод:</b> Використання RLS для постійного оновлення параметрів моделі спектра сигналу на основі нових даних мови.</li> <li><b>•• Переваги:</b> RLS може адаптуватися до змін у спектрі мовного сигналу, спричинених змінами інтонації, просодії або акустичного середовища.</li> <li><b>•• Результат:</b> Точна оцінка спектра мовного сигналу в кожен момент часу, що може використовуватися для таких завдань, як розпізнавання мови або синтез мови.</li> </ul> <p><b>• Приклад 2:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>•• Задача:</b> Виявлення та відстеження спектральних ліній у спектрі хімічної сполуки.</li> <li><b>•• Метод:</b> Використання RLS для моделювання спектра кожної спектральної лінії та віднімання цих моделей від загального спектра.</li> <li><b>•• Переваги:</b> RLS може точно оцінювати частоту та амплітуду спектральних ліній, навіть якщо вони перекриваються або затьмарені шумом.</li> <li><b>•• Результат:</b> Ідентифікація та кількісна оцінка хімічних сполук у зразку, що може використовуватися для таких завдань, як хімічний аналіз або контроль якості.</li> </ul>	<p><b>• Приклад 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>•• Задача:</b> Відстеження траєкторії супутника на орбіті.</li> <li><b>•• Метод:</b> Використання фільтра Калмана для оцінки стану супутника (положення, швидкість) на основі шумових вимірювань його положення, отриманих з GPS.</li> <li><b>•• Переваги:</b> Фільтр Калмана може враховувати динаміку руху супутника та вплив шуму на вимірювання GPS, забезпечуючи точну оцінку траєкторії.</li> <li><b>•• Результат:</b> Дані про траєкторію супутника, які можуть використовуватися для таких завдань, як навігація, зв'язок або наукові дослідження.</li> </ul> <p><b>• Приклад 2:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>•• Задача:</b> Навігація та позиціонування безпілотного літального апарату (БПЛА) в динамічному середовищі.</li> <li><b>•• Метод:</b> Використання фільтра Калмана для оцінки стану БПЛА (положення, орієнтація, швидкість) на основі даних з датчиків, таких як GPS, акселерометри та гіроскопи.</li> <li><b>•• Переваги:</b> Фільтр Калмана може поєднувати дані з різних датчиків, враховуючи їхні похибки та шуми, забезпечуючи точну оцінку стану БПЛА.</li> <li><b>•• Результат:</b> Дані про навігацію та позиціонування БПЛА, які можуть використовуватися для автономного польоту, картографування або інших завдань.</li> </ul>
---	---

Рисунок 2.4 – Приклади застосування адаптивних алгоритмів у відстеженні спектру передавача [4, 22, 26]

Незважаючи на прогрес в обробці даних спектрограм, реалізація алгоритмів відстеження спектру передавача створює кілька проблем. Обробка даних спектрограм у режимі реального часу вимагає значних обчислювальних ресурсів, особливо при роботі з великими обсягами даних у

системах зв'язку. Крім того, пом'якшення шуму та перешкод у даних спектрограми залишається критичною проблемою, оскільки це може спотворити аналіз сигналу та вплинути на точність відстеження спектру передавача [3]. Щоб вирішити ці проблеми, майбутні напрямки досліджень в обробці даних спектрограм можуть зосередитися на розробці ефективних алгоритмів, які оптимізують використання обчислювальних ресурсів і підвищують шумостійкість. Подолавши ці перешкоди реалізації, сфера обробки даних спектрограм може просунутися до більш надійних і ефективних рішень відстеження спектру передавача.

Підсумовуючи, обробка даних спектрограми для відстеження спектру передавача охоплює різноманітні методи обробки сигналів, алгоритми відстеження, проблеми впровадження та майбутні напрямки. Використовуючи методи частотно-часового аналізу, адаптивні алгоритми та вирішуючи обчислювальні обмеження та шумові перешкоди, дослідники можуть підвищити точність і ефективність відстеження спектру передавача в системах зв'язку. Оскільки технологія продовжує розвиватися, очікується, що подальший прогрес в обробці даних спектрограм сприятиме інноваціям у моніторингу спектру та аналізі сигналів, що призведе до покращення продуктивності та надійності сучасних комунікаційних мереж.

## 2.7 Постобробка

Спектр післясвітіння - це частотно-часове представлення, яке показує відсоток часу, протягом якого ця частота присутня в сигналі. Спектр післясвітіння являє собою гістограму в просторі потужності та частоти. Що довше зберігається певна частота в сигналі в міру його розвитку, то вищим є її відсоток часу, а отже, то яскравішим або «гарячішим» є її колір на дисплеї.

Ця методика використовується для створення плавних переходів між часовими інтервалами, що допомагає зменшити шум і зробити спектрограму більш читабельною.

Щоб обчислити спектр післясвітіння потрібно виконати наступні кроки:

1. Обчислити спектрограму за допомогою заданого витoku, тимчасової роздільної здатності та перекриття.

2. Розділити значення потужності та частоти на 2D інтервали.

3. Для кожного значення часу обчислити двовимірну гістограму логарифма спектра потужності. Для кожного інтервалу потужності, де в цей момент є енергія сигналу, збільшити відповідний елемент матриці на 1. Підсумувати гістограми для всіх часових значень.

4. Побудувати накопичену гістограму залежно від потужності та частоти, при цьому колір буде пропорційний логарифму відліків гістограми, вираженому у вигляді нормалізованих відсотків. Щоб представити нульові значення, потрібно використати половину найменшої можливої величини (рис. 2.5).

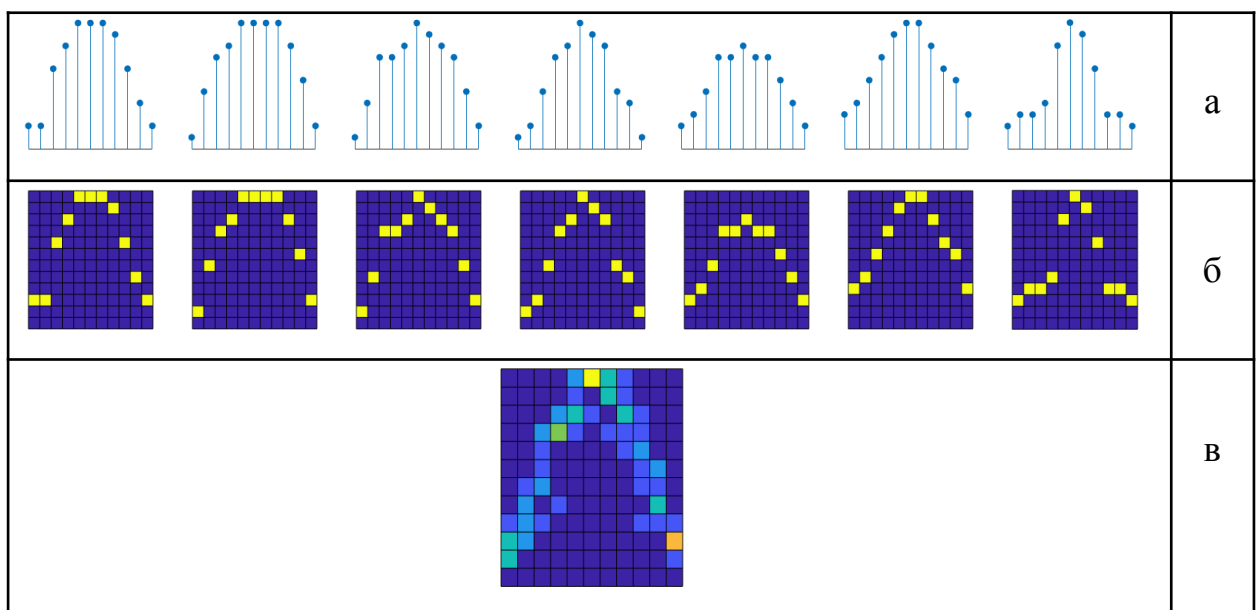


Рисунок 2.5 – Спектр потужності (а), двовимірні гістограми спектру потужності (б) та результуюча гістограма (в) [29]

Згладжування є технікою, яка застосовується до спектральних даних для зменшення шуму та покращення візуальної якості спектрограми. Це досягається шляхом використання різних віконних функцій. Згладжування дозволяє зменшити витікання спектра, але при цьому частково знижується роздільна здатність у частотній області. Віконні функції були розглянуті у розділі. 2.3

Порівняння методів згладжування та післясвітіння

Згладжування:

Основна мета: Зменшення шуму та витікання спектра за допомогою віконних функцій.

Використання: Застосовується до кожного сегмента сигналу перед перетворенням Фур'є.

Ефекти: Знижує витікання, але може зменшити частотну роздільну здатність.

Віконні функції: Різні віконні функції забезпечують різні компроміси між роздільною здатністю і згладжуванням.

Післясвітіння:

Основна мета: Згладжування спектральних даних у часі для зменшення шуму та створення плавних переходів між часовими інтервалами.

Використання: Застосовується до вже отриманих спектральних даних.

Ефекти: Знижує шум, забезпечує плавні переходи, але може призвести до розмиття швидких змін у часі.

Метод: Експоненційне згладжування з використанням коефіцієнта затухання

## 3 ЗАСТОСУВАННЯ СПЕКТРОГРАМ ДЛЯ ДЕТЕКЦІЇ МОДУЛЬОВАНИХ РАДІОПЕРЕДАЧ

### 3.1 Спектр радіопередачі ( детекція основної частоти і гармонік )

Спектр радіопередачі – це складна сфера, яка передбачає виявлення основної частоти та гармонік [19]. Розуміння цих концепцій має вирішальне значення для оптимізації виявлення сигналу та мінімізації спотворень у радіохвилях.

Основна частота в радіохвилях відноситься до найнижчої частотної складової сигналу. Це важливо для визначення загальних характеристик сигналу. Для виявлення основної частоти використовуються різні методи, причому аналіз Фур'є є широко використовуваним методом. Аналіз Фур'є передбачає розкладання складної форми сигналу на складові частоти, що дозволяє ідентифікувати основну частоту [31]. Аналізуючи спектр сигналу, дослідники можуть точно визначити основну частоту та отримати цінну інформацію про властивості сигналу.

Гармоніки в радіохвилях — це кратні частоти основної частоти, які виникають у цілих числах, кратних основній частоті [9]. Ідентифікація та аналіз гармонік має вирішальне значення для розуміння спектрального складу сигналу. Стратегії пом'якшення гармонійних спотворень:

- Фільтрація: Використання фільтрів для придушення гармонік і виділення основної частоти.
- Методи обробки сигналу: Використання методів, таких як фазова синхронізація або декореляція, для розділення основної частоти та гармонік [32].

Методи спектрального аналізу, такі як перетворення Фур'є та оцінка спектральної щільності, використовуються для ідентифікації та кількісного визначення гармонік у радіопередачі. Вивчаючи гармоніки, присутні в

сигналі, дослідники можуть отримати уявлення про структуру сигналу та потенційно виявити будь-які спотворення чи аномалії.

Співвідношення між основною частотою та гармоніками є фундаментальним аспектом аналізу сигналів у радіопередачі. Наявність гармонік може вплинути на точність визначення основної частоти, що призведе до потенційних спотворень у сигналі [3]. Щоб пом'якшити гармонійні спотворення та оптимізувати виявлення сигналу, можна застосувати такі стратегії, як фільтрація та методи обробки сигналу. Розуміючи теоретичні основи основної частоти та гармонік, дослідники можуть розробити ефективні рішення для мінімізації спотворень і покращення виявлення сигналу під час радіопередачі:

Ряд Фур'є: Ряд Фур'є стверджує, що будь-яку періодичну функцію можна представити як суму синусоїдальних функцій з різними частотами.

Спектр сигналу: Спектр сигналу - це графічне представлення його частотних компонентів. Основна частота відповідає найвищому піку в спектрі.

Підсумовуючи, виявлення основної частоти та гармонік відіграє вирішальну роль в аналізі та оптимізації сигналів радіопередачі. Використовуючи такі методи, як аналіз Фур'є та спектральний аналіз, дослідники можуть отримати цінну інформацію про спектральний склад сигналів і підвищити точність виявлення сигналів. Розуміння зв'язку між основною частотою та гармоніками має важливе значення для пом'якшення спотворень і максимізації чіткості сигналу в програмах радіопередачі.

### 3.2 Спектр частотно модульованого сигналу

Частотна модуляція (FM) — це широко використовуваний метод обробки сигналів, який має ряд переваг перед іншими методами модуляції. Розуміння спектра частотно-модульованого сигналу має вирішальне значення для розуміння його характеристик і застосувань. Заглибимося в характеристики частотно-модульованих сигналів, проаналізуємо їх частотний спектр і дослідимо різні застосування цієї техніки модуляції.

Частотна модуляція передбачає зміну частоти несучого сигналу пропорційно амплітуді модулюючого сигналу. На відміну від амплітудної модуляції, де регулюється амплітуда несучого сигналу, FM змінює частоту. Ця різниця є значною, оскільки вона призводить до того, що FM-сигнали менш чутливі до шуму та перешкод порівняно з AM-сигналами, табл. 3.1.. Переваги частотної модуляції включають більш високе відношення сигнал/шум, що покращує якість сигналу, і здатність передавати сигнали на великі відстані без істотного погіршення (таб. 3.1).

Розглянемо графік водоспаду в FM-діапазоні, створений на основі програмно-визначеного радіо (рис. 3.1).

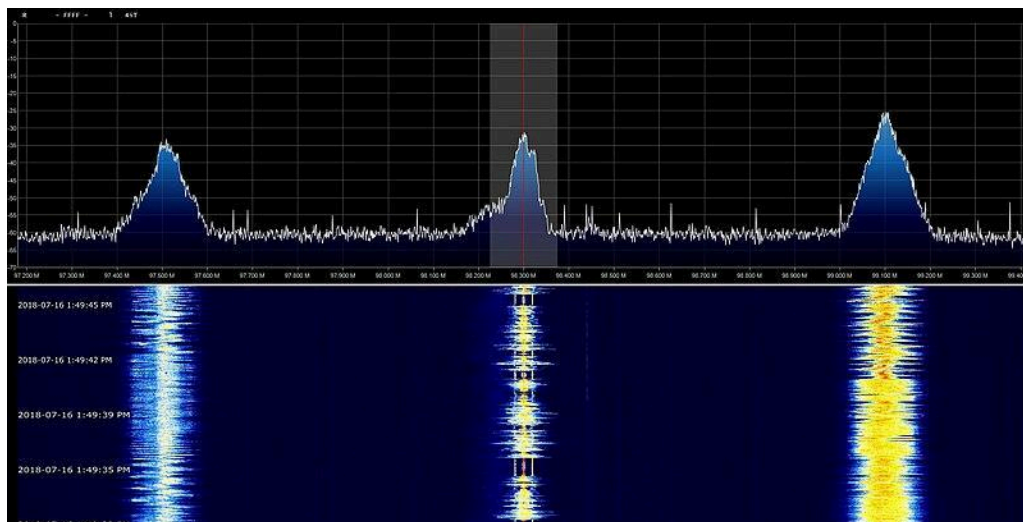


Рисунок 3.1 – Графік водоспаду в FM-діапазоні, створений на основі програмно-визначеного радіо (SDR) [33]

За спектрограмою можемо побачити три сильні місцеві станції; мова і музика демонструють різні патерни залежності частоти від часу. Кольорова область під графіком спектра показує, скільки енергії присутнє на кожній частоті протягом певного періоду часу. Більш теплі кольори відповідають потужнішим сигналам, а холодні – менш потужним. Синій - фоновий шум (іноді його називають статичним).

Таблиця 3.1 – Порівняння амплітудної модуляції (АМ) та частотної модуляції (ЧМ) [20, 34]

Характеристика	Амплітудна модуляція (АМ)	Частотна модуляція (ЧМ)
Модульований параметр	Амплітуда несучого сигналу	Частота несучого сигналу
Стійкість до шуму	Низька	Висока
Якість звуку	Низька	Висока
Ефективність використання спектру	Низька	Висока
Складність	Низька	Висока
Вартість	Низька	Висока
Приклади застосування	АМ-радіомовлення, ранні мобільні телефони	FM-радіомовлення, супутниковий зв'язок, радіолокація

Спектр частотно-модульованого сигналу складається з нескінченної кількості бічних смуг, що оточують несучу частоту. Ці бічні смуги, розташовані на відстані, кратній частоті модуляції, несуть інформацію, що передається. Математично частотний спектр FM-сигналу можна виразити за допомогою функцій Бесселя, які описують амплітуди бічних смуг. При порівнянні частотного спектру FM-сигналів з іншими методами модуляції, такими як АМ або фазова модуляція, FM демонструє ширшу смугу через наявність кількох бічних смуг.

Частотна модуляція знаходить різні застосування в різних галузях. У FM-радіомовленні використання частотної модуляції дозволяє передавати аудіо з високою точністю, що робить його популярним вибором для музичного та голосового мовлення (таб. 3.2).

Таблиця 3.2 – Приклади амплітудної модуляції (АМ) та частотної модуляції (ЧМ) [35, 36]

Тип модуляції	Застосування	Переваги	Недоліки
АМ	АМ-радіомовлення	Проста реалізація, низька вартість	Низька якість звуку, чутливість до шуму
FM	FM-радіомовлення	Висока якість звуку, стійкість до шуму	Складніша реалізація, вища вартість
АМ	Аналоговий мобільний зв'язок (AMPS, NMT)	Широке покриття, доступність	Низька якість звуку, обмежена пропускна здатність
FM	Цифровий мобільний зв'язок (GSM, CDMA)	Висока якість звуку, велика пропускна здатність	Більш складні та дорогі мережі
FM	Супутниковий зв'язок	Надійний зв'язок на великі відстані	Висока вартість, обмежена пропускна здатність

Радарні системи використовують частотну модуляцію для точного визначення дальності та швидкості цілей. Крім того, у галузі телекомунікацій частотна модуляція використовується для передачі даних, пропонуючи надійний метод для надійного надсилання цифрової інформації на великі відстані.

Підсумовуючи, розуміння спектру частотно-модульованого сигналу дає змогу зрозуміти його унікальні характеристики та застосування. Частотна модуляція виділяється своєю стійкістю до шуму, високоякісною передачею сигналу та універсальністю в різних галузях промисловості. Досліджуючи аналіз спектру FM-сигналів і заглиблюючись у його практичне використання, ми можемо оцінити важливість цієї техніки модуляції в сучасних системах зв'язку.

### 3.3 Спектр фазоманіпульованого сигналу

Фазова маніпуляція (ФМ, Phase-Shift Keying, PSK) – це метод аналогової або цифрової модуляції, в якому інформація кодується шляхом зміни миттєвої фази несучої хвилі. На відміну від амплітудної модуляції (АМ), де змінюється амплітуда несучої, ФМ зберігає амплітуду постійною. Завдяки цьому ФМ забезпечує стійкість до амплітудних шумів та перешкод, що є особливо важливим у багатьох телекомунікаційних системах.

Існує кілька видів PSK, що відрізняються кількістю можливих фазових станів та, відповідно, кількістю біт, які можна передати за один період несучої:

1. Бінарна фазова модуляція (BPSK, Binary Phase Shift Keying) - це найпростіший вид фазової маніпуляції, де використовуються два фазові стани ( $0^\circ$  та  $180^\circ$ ) для передачі одного біта даних за один період несучої хвилі. Спектр BPSK сигналу характеризується неперервним розподілом енергії по частотному діапазону та має вигляд основної пелюстки з боковими пелюстками, що поступово зменшуються. Складається з двох симетричних бічних смуг, розташованих по обидва боки від несучої частоти. Ширина кожної бічної смуги приблизно дорівнює швидкості передачі даних.

До переваг методу можна віднести простоту реалізації. BPSK є найпростішим методом фазової маніпуляції, що робить його легким у реалізації як на апаратному, так і на програмному рівні. Також, BPSK має високу стійкість до шумів та перешкод, що робить його придатним для використання в умовах низького відношення сигнал/шум.

До недоліків даного методу можна віднести Низьку спектральну ефективність. BPSK передає лише один біт інформації за один період несучої, що робить його менш ефективним з точки зору використання спектра порівняно з іншими методами модуляції, такими як QPSK або QAM (рис. 3.2).

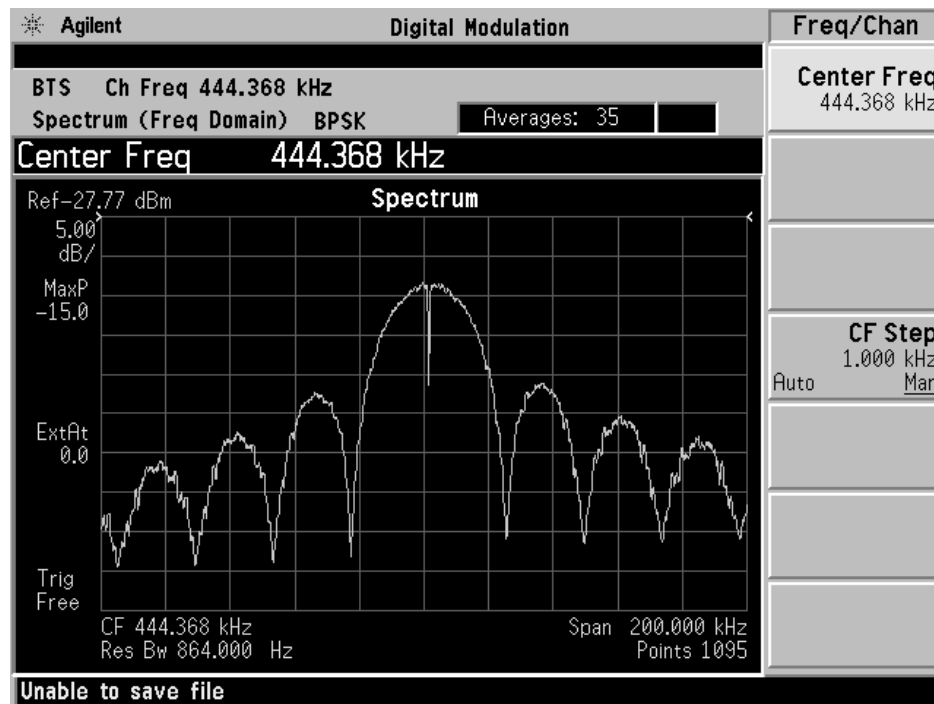


Рисунок 3.2 – Спектр BPSK [37]

2. Квадратурна фазова маніпуляція (QPSK, Quadrature Phase Shift Keying) - це цифровий метод модуляції, який передає два біти інформації за один період несучої хвилі. Це досягається шляхом зміни фази несучої на одне з чотирьох можливих значень:  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  або  $270^\circ$ . QPSK є більш ефективним з точки зору використання спектра, ніж BPSK, оскільки передає вдвічі більше інформації за той самий час.

Спектр QPSK сигналу є неперервним і має вигляд, подібний до спектра BPSK, але з більш вузькою основною пелюсткою. Складається з двох бічних смуг, розташованих симетрично відносно несучої частоти. Однак, на відміну

від BPSK, кожна бічна смуга містить інформацію про два біти даних, що передаються одночасно.

До переваг методу можна віднести високу спектральну ефективність. QPSK передає два біти інформації за один період несучої, що дозволяє досягти вищої швидкості передачі даних порівняно з BPSK при тій самій ширині смуги каналу. Також, хоча QPSK є складнішим за BPSK, його реалізація все ще відносно проста порівняно з більш високими порядками модуляції, такими як 8PSK або QAM (рис. 3.3).

До недоліків методу можна віднести меншу стійкість до шумів та перешкод, ніж BPSK, оскільки відстань між фазовими станами на фазовій діаграмі менша. Також, Для правильної демодуляції QPSK сигналу необхідно забезпечити точну синхронізацію фази несучої на приймачі (рис. 3.4).

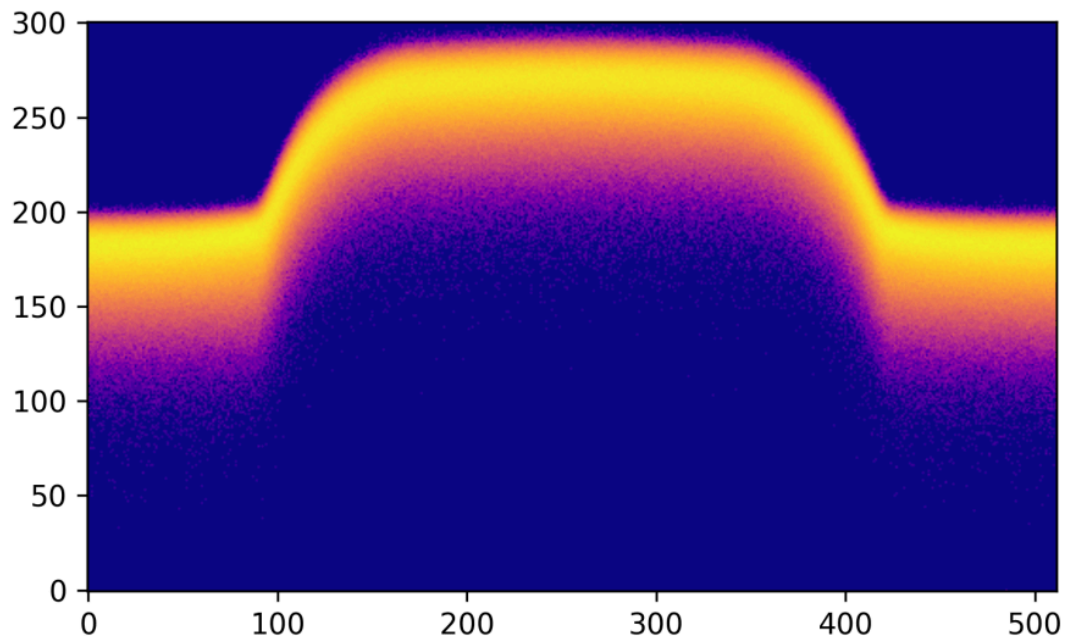


Рисунок 3.3 – Спектр QPSK сигналу [38]

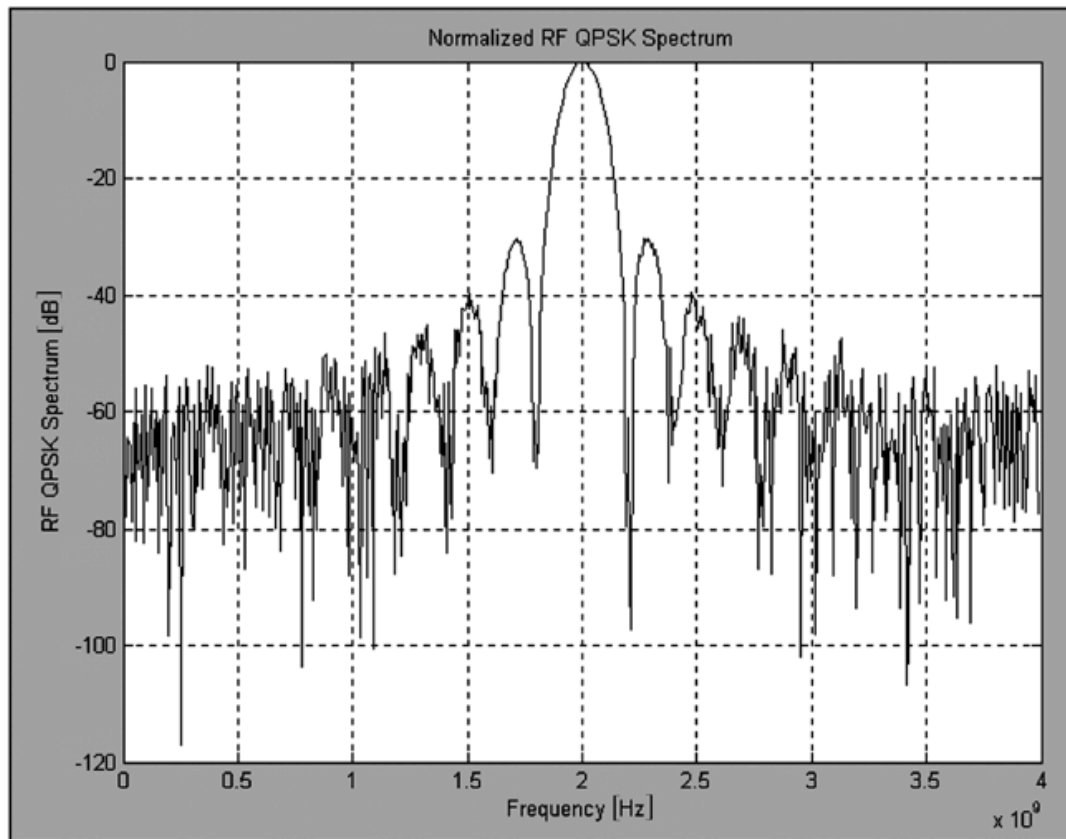


Рисунок 3.4 – Нормалізований спектр QPSK сигналу [39]

3. 8PSK (8-ary Phase Shift Keying) - це метод цифрової модуляції, який передає три біти інформації за один період несучої хвилі. Це досягається шляхом зміни фази несучої на одне з восьми можливих значень:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$  або  $315^\circ$ . 8PSK є більш спектрально ефективним, ніж BPSK та QPSK, але менш стійким до шумів та перешкод.

Спектр 8PSK є неперервним і має вигляд, подібний до спектра сигналу QPSK, але з більш широкою основною пелюсткою. Сигнал складається з двох бічних смуг, розташованих симетрично відносно несучої частоти. Однак, на відміну від BPSK та QPSK, кожна бічна смуга містить інформацію про три біти даних, що передаються одночасно. Це робить 8PSK більш спектрально ефективним, ніж BPSK та QPSK, але також призводить до більш складної структури спектра з більшою кількістю бічних смуг (рис. 3.5).

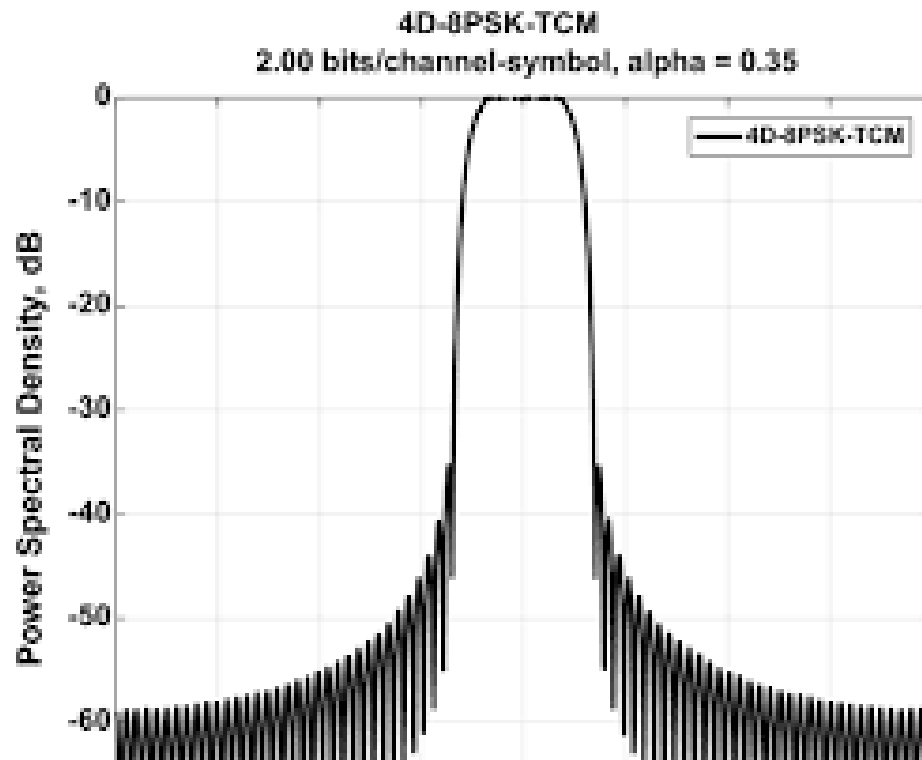


Рисунок 3.5 – Спектр 8PSK сигналу [40]

4. Квадратурна амплітудна модуляція (QAM) - це метод цифрової модуляції, який передає інформацію шляхом одночасної зміни амплітуди і фази несучої хвилі. Цей метод дозволяє передавати більше біт інформації за один період несучої, ніж інші методи модуляції, такі як фазова маніпуляція (PSK).

QAM сигнали можуть бути представлені у вигляді суми двох амплітудно-модульованих сигналів, що передаються на одній частоті, але з фазовим зсувом 90 градусів. Ці два сигнали називаються квадратурними компонентами, звідси і назва "квадратурна амплітудна модуляція".

Існує багато різних схем QAM, які відрізняються кількістю можливих комбінацій амплітуди та фази. Найпоширеніші з них:

- \_ 4-QAM: 2 амплітудні рівні, 4 фазові стани, 2 біти на символ.
- \_ 16-QAM: 4 амплітудні рівні, 4 фазові стани, 4 біти на символ.
- \_ 64-QAM: 8 амплітудних рівнів, 8 фазових станів, 6 біт на символ.

- \_ 256-QAM: 16 амплітудних рівнів, 16 фазових станів, 8 біт на символ.

Зі збільшенням кількості рівнів зростає швидкість передачі даних, але також зростає складність демодуляції та чутливість до шумів та перешкод.

Спектр QAM сигналу є складнішим за спектр PSK сигналу, оскільки він містить більше бічних смуг. Кількість та амплітуди бічних смуг залежать від конкретної схеми QAM та індексу модуляції. Ширина спектра QAM сигналу зростає зі збільшенням порядку модуляції (4-QAM -> 16-QAM -> 64-QAM -> 256-QAM). Це означає, що для передачі сигналу з вищою швидкістю передачі даних потрібна більша смуга пропускання каналу зв'язку (рис. 3.6).

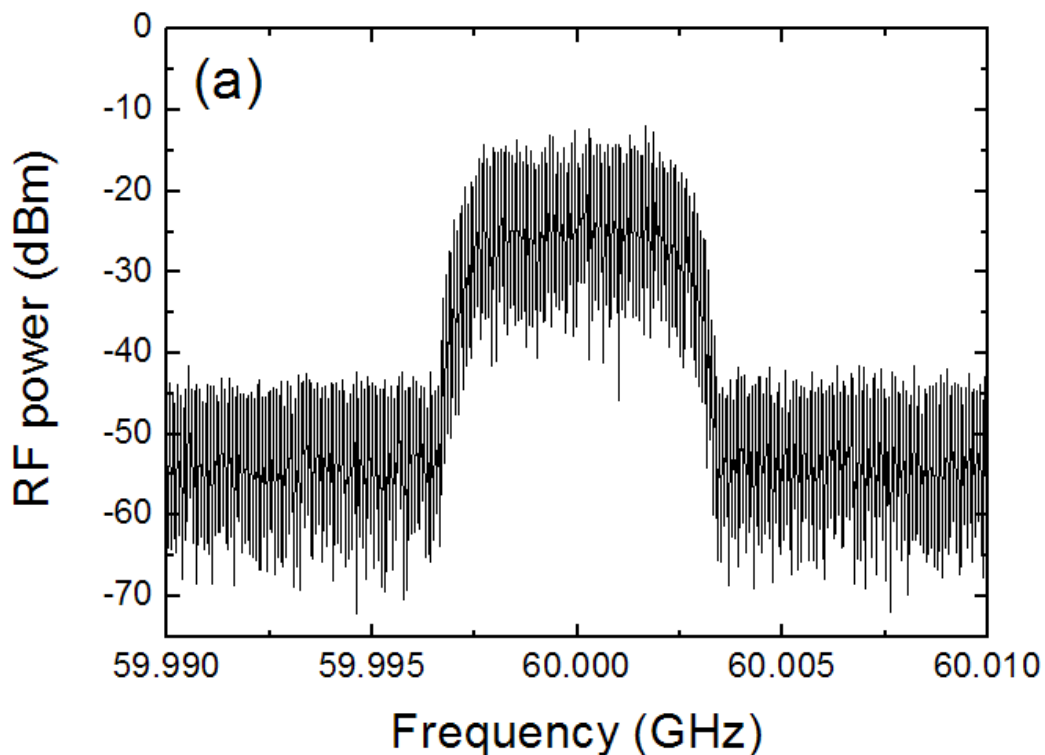


Рисунок 3.6 – Спектр 16 QAM сигналу [41]

Маніпулювання фазою в обробці сигналу передбачає навмисну модифікацію фази сигналу, залишаючи його величину незмінною. Ця техніка необхідна для аналізу сигналів і проектування систем зв'язку. Регулюючи фазу сигналу, інженери можуть контролювати час і синхронізацію передачі

даних. Методи маніпулювання фазою включають зсув фази, коли фаза сигналу змінюється на фіксовану величину, і фазову модуляцію, яка змінює фазу на основі інформації, що передається [42]. Ці методи є основоположними в обробці сигналу, дозволяючи виконувати такі завдання, як фільтрація, демодуляція та відновлення сигналу.

Застосування фазової маніпуляції в обробці сигналів є великими та різноманітними (рис. 3.7).

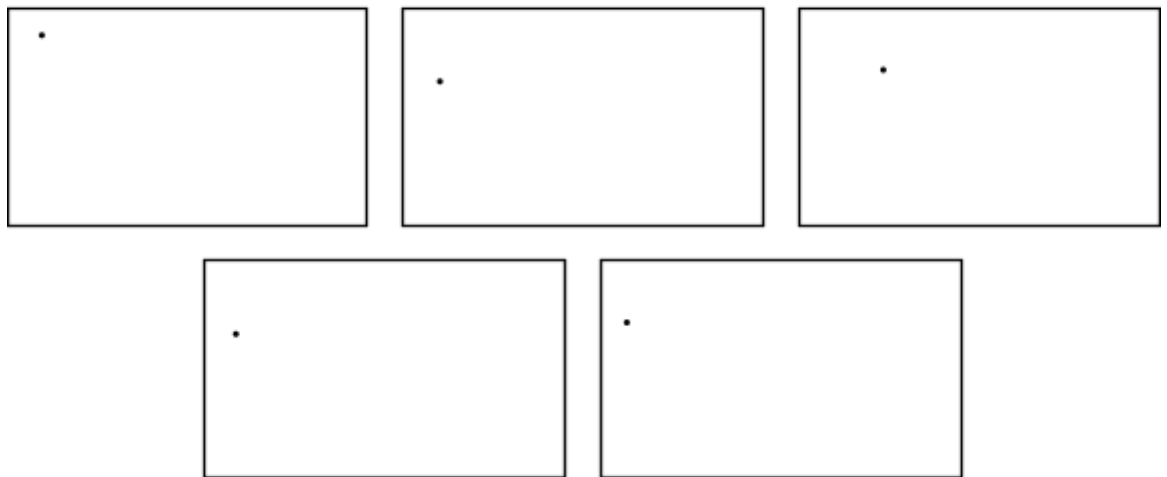


Рисунок 3.7 – Застосування фазової маніпуляції в обробці сигналів [21, 25]

У обробці аудіосигналу фазова маніпуляція використовується для створення таких ефектів, як фазування та фленджування, що покращує слуховий досвід. Крім того, у радіолокаційних і гідролокаційних системах маніпулювання фазою переданих сигналів допомагає виявити цілі та супроводжувати їх шляхом аналізу відбитих сигналів.

У бездротовому зв'язку фазова маніпуляція має вирішальне значення для кодування та декодування сигналів, що забезпечує надійну передачу даних на великі відстані. Ці програми підкреслюють універсальність і важливість маніпуляції фазою в сучасних системах обробки сигналів:

- Мобільні телефони: Цифрові мобільні телефони, такі як GSM (Global System for Mobile Communications) та CDMA (Code Division Multiple Access), використовують QPSK та BPSK для передачі двійкових даних [7].
- Супутникове телебачення: Супутникове телебачення використовує ФМ для передачі відео- та аудіосигналів.
- Wi-Fi: Wi-Fi (Wireless Fidelity) використовує OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), який поєднує ФМ з іншими методами модуляції, для передачі даних високої швидкості [9].

Незважаючи на свої переваги, фазова маніпуляція також створює проблеми та обмеження в обробці сигналу. Неправильна маніпуляція фазою може призвести до фазових спотворень і помилок, що вплине на якість обробленого сигналу. Розробка алгоритмів для маніпулювання фазою в реальному часі може бути складною, вимагаючи ретельного розгляду обчислювальної ефективності та точності. Крім того, досягнення точного керування фазою в певних задачах обробки сигналу, таких як формування променя в антенних решітках, може бути складним через практичні обмеження та фактори навколишнього середовища. Ці проблеми підкреслюють важливість розуміння обмежень фазових маніпуляцій і розробки надійних методів пом'якшення потенційних проблем.

### 3.4 Спектр OFDM

OFDM - це метод модуляції, який використовує множинні ортогональні піднесучі для передачі цифрових даних. Кожна піднесуча модулюється окремим потоком даних з використанням цифрової модуляції, такої як квадратурна амплітудна модуляція (QAM) або фазова маніпуляція (PSK).

Ортогональність піднесучих забезпечує їх спектральну ефективність, дозволяючи їм перекриватися без інтерференції.

Принцип роботи OFDM базується на розділенні високошвидкісного потоку даних на декілька паралельних потоків з нижчою швидкістю. Кожен з цих потоків модулюється на окрему ортогональну піднесучу частоту. Ортогональність піднесучих гарантує, що їх спектри не перекриваються та не створюють взаємних перешкод, що дозволяє досягти високої спектральної ефективності (рис. 3.8).

Переваги:

Висока спектральна ефективність: Ортогональність піднесучих дозволяє OFDM досягти високої спектральної ефективності, що є критичним у системах з обмеженим спектром.

Стійкість до багатопроменевого поширення: Завдяки CP та ортогональності піднесучих, OFDM демонструє високу стійкість до багатопроменевого поширення, що є поширеною проблемою в бездротових каналах зв'язку.

Стійкість до частотно-селективного федингу: OFDM розділяє широкосмуговий канал на багато вузькосмугових підканалів, що дозволяє ефективно боротися з частотно-селективним федингом.

Гнучкість: Параметри OFDM, такі як кількість піднесучих, тип модуляції та потужність, можуть бути адаптовані до умов каналу зв'язку для досягнення оптимальної продуктивності.

Незважаючи на численні переваги, OFDM має і деякі недоліки. Зокрема, він чутливий до зсуву частоти, що вимагає точної синхронізації між передавачем та приймачем. Крім того, OFDM сигнали мають високий пік-фактор, що може призводити до нелінійних спотворень та зниження енергоефективності.

Застосування OFDM є надзвичайно широким. Він використовується в багатьох сучасних стандартах бездротового зв'язку, включаючи Wi-Fi (IEEE 802.11a/g/n/ac/ax), WiMAX (IEEE 802.16), а також мобільні мережі четвертого

(LTE) та п'ятого (5G) поколінь. OFDM також знайшов своє застосування в системах цифрового телебачення (DVB-T/T2) (рис. 3.9).

Спектр OFDM сигналу має кілька характерних особливостей, які відрізняють його від інших типів сигналів:

1. Дискретність: Спектр OFDM сигналу складається з набору дискретних піків, які відповідають окремим піднесучим частотам. Це пов'язано з тим, що кожна піднесуча несе вузькосмуговий сигнал, що має обмежену ширину спектра.

2. Рівномірний розподіл: Піднесучі частоти в OFDM сигналі розташовані рівномірно, з фіксованим інтервалом між ними. Це забезпечує ортогональність піднесучих, що дозволяє їм не заважати одна одній.

3. Обмежена ширина спектра: Кожна піднесуча в OFDM сигналі має обмежену ширину спектра, що визначається швидкістю передачі даних та типом модуляції. Загальна ширина спектра OFDM сигналу залежить від кількості піднесучих та інтервалу між ними.

4. Циклічний префікс: Спектр OFDM сигналу містить копію кінця символу, яка називається циклічним префіксом (CP). CP додається для зменшення міжсимвольної інтерференції (ISI) та забезпечення стійкості до багатопроменевого поширення.

5. Високий пік-фактор: OFDM сигнали мають високий пік-фактор, що означає, що пікова потужність сигналу значно перевищує його середню потужність. Це може призводити до нелінійних спотворень та зниження енергоефективності.

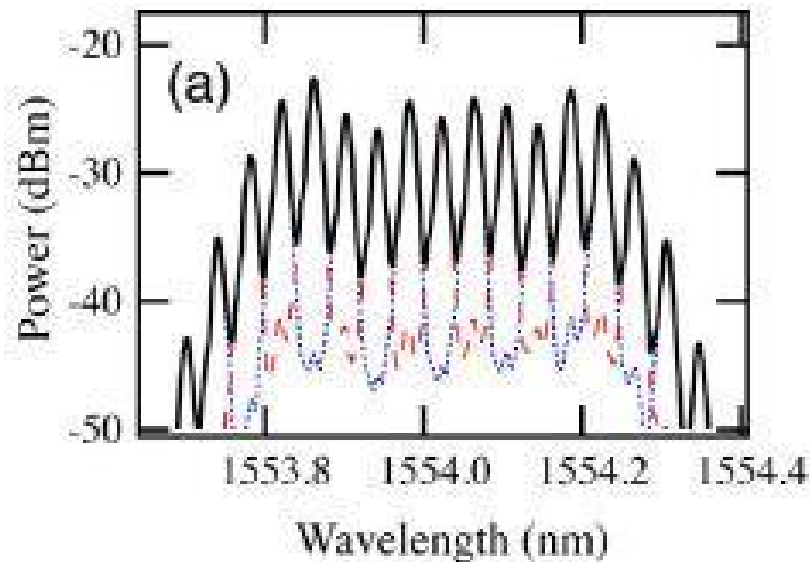


Рисунок 3.8 – Часовий спектр OFDM [43]

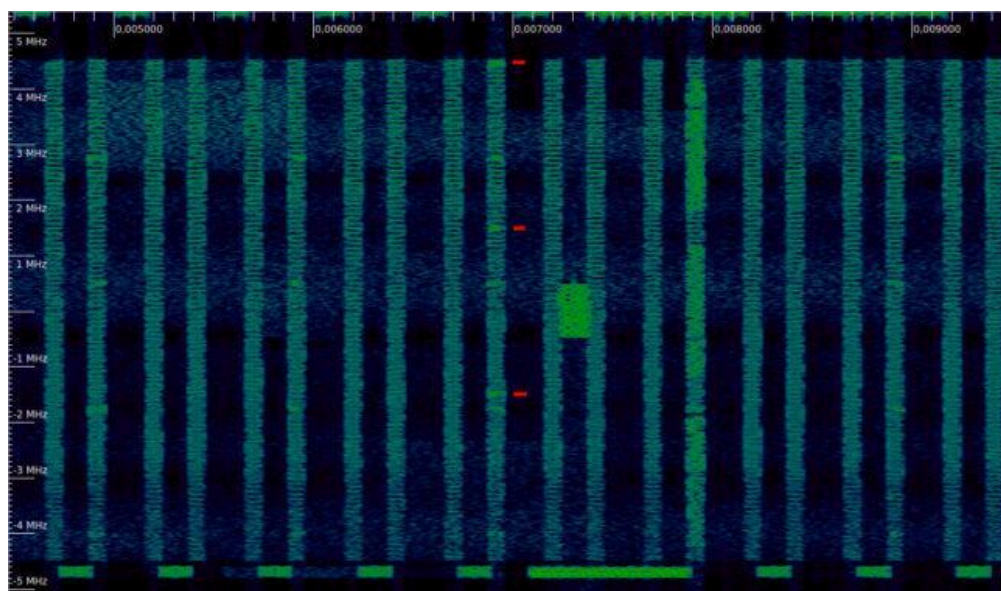


Рисунок 3.9 – Водоспад сигналу низхідної лінії LTE [44]

Візуально спектр OFDM сигналу можна представити у вигляді "частотної гребінки", де кожен зубчик відповідає окремій піднесучій. Висота зубчиків визначається амплітудою піднесучої, а їх розташування - частотою.

Ці особливості спектру OFDM сигналу мають важливе значення для його застосування в різних системах зв'язку. Наприклад, дискретність та рівномірний розподіл піднесучих дозволяють ефективно використовувати частотний ресурс, а обмежена ширина спектра піднесучих та наявність

циклічного префікса забезпечують стійкість до перешкод та багатопроменевого поширення.

### 3.5 Спектр ППРЧ

Характеристика спектра ППРЧ:

**Широкопasmовість:** Спектр ППРЧ сигналу займає значно більшу смугу частот, ніж спектр сигналу з фіксованою несучою частотою. Наприклад, якщо сигнал з фіксованою несучою займає смугу 10 кГц, то ППРЧ сигнал з 100 частотними каналами може займати смугу 1 МГц. Це пов'язано з тим, що сигнал постійно перемикається між різними частотними каналами.

**Низька спектральна щільність потужності:** Незважаючи на широку смугу частот, потужність сигналу розподілена по цій смузі нерівномірно. В кожен момент часу сигнал займає лише один вузький частотний канал, тому його спектральна щільність потужності є відносно низькою. Це робить ППРЧ сигнали менш помітними для перехоплювачів і стійкішими до вузькопasmових перешкод.

**Псевдовипадковий характер:** Розподіл енергії сигналу по частотному діапазону є псевдовипадковим, оскільки частота несучої змінюється за псевдовипадковим законом, відомим лише передавачу та приймачу. Це значно ускладнює виявлення та перехоплення сигналу, оскільки перехоплювач не може передбачити, на якій частоті буде передаватися наступний фрагмент інформації.

**Наявність бічних смуг:** Як і будь-який модульований сигнал, ППРЧ сигнал має бічні смуги, розташовані по обидва боки від несучої частоти кожного каналу. Ширина бічних смуг залежить від швидкості модуляції та виду модулюючого сигналу. Наприклад, при використанні гауссової частотної

модуляції (GFSK) бічні смуги будуть мати більш плавний спад, ніж при використанні прямокутної частотної модуляції (FSK) (рис. 3.10).

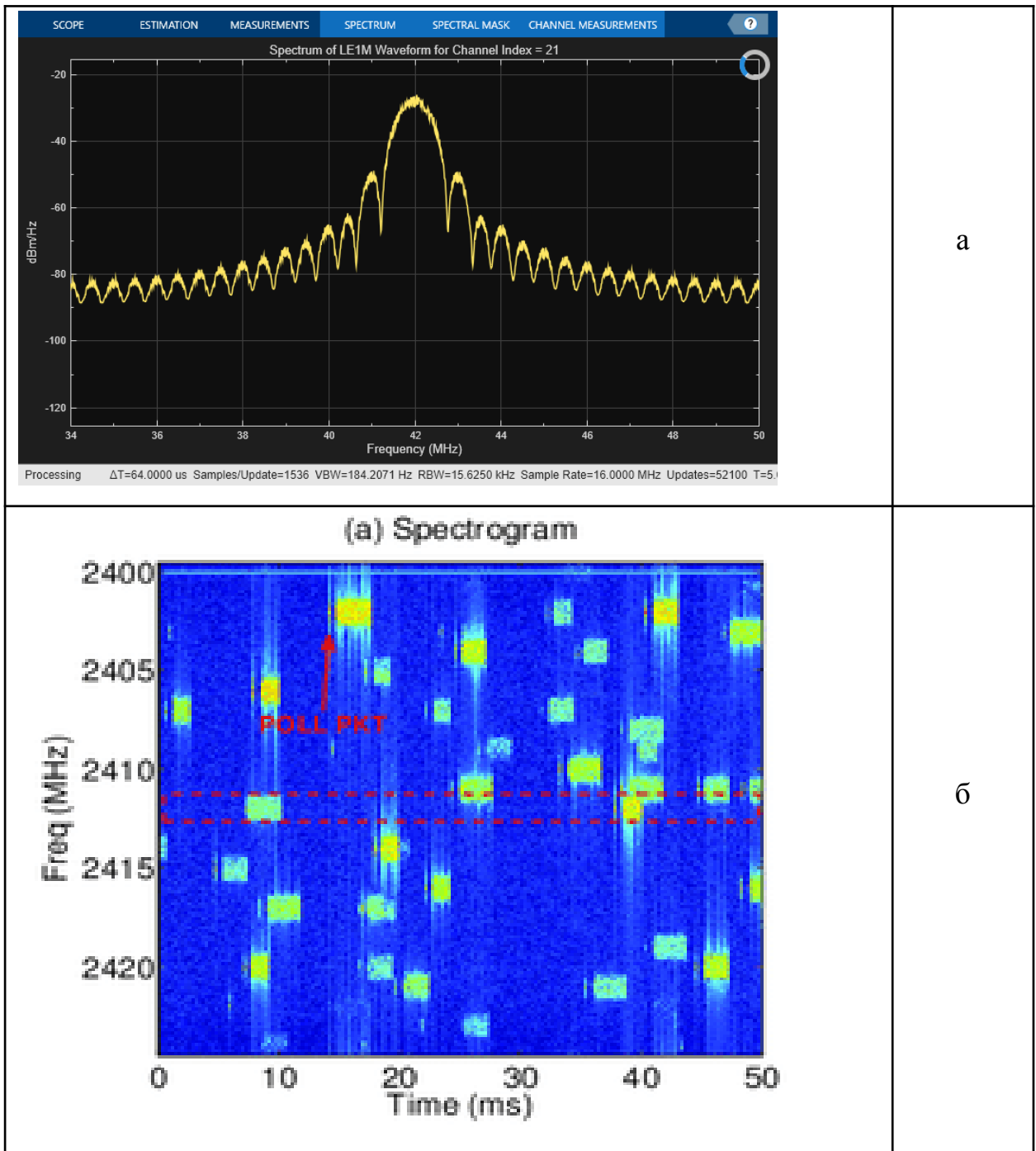


Рисунок 3.10 – Спектр сигналу Bluetooth (а) та спектрограма сигналу Bluetooth (б) [45], [46]

Аналіз спектра ППРЧ сигналу:

Для аналізу спектра ППРЧ сигналу застосовуються спеціалізовані методи та прилади, що враховують його унікальні особливості.

Спектроаналізатор з режимом "водоспаду" (waterfall display): Цей режим дозволяє візуалізувати зміну спектра сигналу в часі, що є особливо корисним для аналізу ППРЧ сигналів, де частота несучої постійно змінюється.

Спектроаналізатор з функцією "persistence": Ця функція дозволяє накопичувати спектр сигналу протягом певного часу, що дозволяє виявити слабкі сигнали та оцінити їх статистичні характеристики, такі як ймовірність появи сигналу на певній частоті.

Спеціалізоване програмне забезпечення: Існує ряд програмних продуктів, призначених для аналізу ППРЧ сигналів. Вони дозволяють визначати параметри сигналу, такі як кількість частотних каналів, швидкість перебудови, тип модуляції, а також проводити демодуляцію сигналу для отримання переданої інформації.

Застосування ППРЧ:

ППРЧ технологія знаходить широке застосування в різних галузях, завдяки своїй стійкості до перешкод та можливості забезпечення конфіденційності передачі даних.

Військова справа: Забезпечення стійкості до перешкод та перехоплення в системах зв'язку та радіолокації.

Цивільний зв'язок: Мобільний зв'язок (GSM, CDMA), бездротові локальні мережі (Wi-Fi), Bluetooth, системи дистанційного керування.

Навігація: GPS, ГЛОНАСС, Galileo.

### 3.6 Узагальнений алгоритм детектора

Спочатку встановлюються параметри розгортки. Визначаються верхня та нижня частоти, ширина біна в кілогерцах, рівень підсилення на вході, а також налаштування для FFTW (бібліотеки швидкого перетворення Фур'є). Це дозволяє точно налаштувати пристрій для конкретного спектрального аналізу.

Після цього запускається процес вимірювання. В цей час обраховуються значення потужності для кожного біна, і ці дані приймаються з частотою розгортки. Далі ці значення записуються в ковзний буфер, який дозволяє зберігати інформацію протягом певного періоду часу.

Наступним кроком є обчислення для кожного біна максимального, мінімального та середнього значення за задані часові вікна. Це забезпечує створення згладженого графіку та післясвітіння максимальних значень, що є корисним для подальшого аналізу.

Далі визначається поріг шуму за допомогою застосування перцентіля. Це дозволяє коригувати спектрограму на основі отриманого порогового значення рівня шуму. Після цього автоматично обчислюється масштаб відображення, що робить візуалізацію даних більш зручною та точною.

Спектрограма будується на основі середніх або пікових значень з урахуванням порогу шуму. Паралельно створюється гистограма, яка представляє собою суму значень для кожного біна за більшу глибину вікна спостереження, ніж для усереднення.

На цьому етапі завершено роботу програми, але наступні дії дозволяють поглибити аналіз. Гистограма бінаризується для визначення областей інтересу. Потім розгортка вимірювача-аналізатора перелаштовується для кожної з областей інтересу, щоб провести уточнююче дослідження з меншим кроком по частоті.

На завершення формуються висновки щодо наявності несучих каналів передачі в областях інтересу. Аналізується картина діапазону каналу у часі для визначення типу передачі, використовуючи методи розділення каналів та

модуляції. Це дозволяє отримати вичерпну інформацію про характеристики сигналу в досліджуваних областях.

## 4 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТ

### 4.1 Поняття технології SDR

Програмно-обумовлена радіосистема (Software Defined Radio, SDR) - це передова технологія в галузі радіозв'язку, що характеризується перенесенням значної частини функцій обробки сигналу з апаратної реалізації на програмне забезпечення. На відміну від традиційних радіосистем, де модуляція, демодуляція, фільтрація та інші операції здійснюються спеціалізованими мікросхемами, SDR використовує універсальні процесори та програмні алгоритми для виконання цих завдань.

Однією з ключових переваг SDR є можливість легко змінювати тип модуляції сигналу. Це дозволяє використовувати різні методи кодування інформації, такі як амплітудна, частотна або фазова модуляція, залежно від конкретних вимог до якості зв'язку, швидкості передачі даних або стійкості до перешкод.

SDR також забезпечує легке усунення перешкод. Завдяки цифровій обробці сигналу, програмне забезпечення може ефективно фільтрувати небажані сигнали та виділяти корисну інформацію, що значно покращує якість прийому в умовах складного електромагнітного середовища.

Ще однією важливою можливістю SDR є вибір частоти дискретизації та ширини смуги пропускання. Це дозволяє оптимізувати параметри прийому та передачі сигналу для досягнення найкращої якості зв'язку в конкретних умовах. Наприклад, можна використовувати вузьку смугу пропускання для збільшення дальності зв'язку або широку смугу для передачі великого обсягу даних.

Програмне керування радіочастотами — ще одна перевага SDR. Замість використання фізичних регуляторів або перемикачів, частоту можна легко змінювати за допомогою програмного інтерфейсу, що спрощує налаштування та автоматизацію роботи радіообладнання.

## 4.2 SoapySDR, як бібліотека для уніфікації використання SDR

SoapySDR – це універсальний програмний інтерфейс (API), що слугує мостом між різноманітними програмно-визначуваними радіосистемами (SDR) та програмним забезпеченням, яке їх використовує. Він надає уніфікований спосіб взаємодії з SDR-пристроями, незалежно від їх виробника, апаратної платформи чи операційної системи.

SoapySDR забезпечує кросплатформенну підтримку, працюючи на Windows, Linux та macOS. Це дозволяє розробникам створювати програми, які можуть працювати на різних операційних системах без необхідності внесення суттєвих змін у код.

Більше того, SoapySDR сумісний з широким спектром SDR-пристроїв, включаючи популярні моделі від Ettus Research (USRP), Lime Microsystems (LimeSDR), HackRF, AirSpy та багато інших. Завдяки цьому, розробники можуть використовувати один і той самий код для роботи з різними пристроями, що значно спрощує процес розробки та тестування.

SoapySDR має модульну архітектуру, яка дозволяє легко додавати підтримку нових SDR-пристроїв та функцій. Це досягається за допомогою системи плагінів, які можуть бути розроблені та підключені до SoapySDR для розширення його можливостей.

Така гнучкість робить SoapySDR привабливим інструментом для розробників, оскільки вони можуть легко адаптувати його до своїх потреб та використовувати його з різними типами SDR-пристроїв.

SoapySDR має прив'язки для популярних мов програмування, таких як C++, Python, MATLAB та GNU Radio. Це дозволяє розробникам використовувати знайомі їм інструменти та мови для створення програмного забезпечення для SDR.

Крім того, SoapySDR легко інтегрується з іншими програмними бібліотеками та фреймворками, такими як GNU Radio, що робить його ще більш потужним та універсальним інструментом.

SoapySDR є проектом з відкритим вихідним кодом, що означає, що його вихідний код доступний для всіх, хто бажає його вивчити, змінити або покращити. Це сприяє розвитку спільноти розробників, які активно працюють над розширенням можливостей SoapySDR та створенням нових інструментів та додатків на його основі.

SoapySDR знаходить застосування в багатьох галузях, починаючи від радіоаматорства та закінчуючи науковими дослідженнями та промисловими розробками. Він використовується для створення радіоприймачів та передавачів, аналізу спектра, розробки систем радіомоніторингу, радіолокації, бездротового зв'язку та багато іншого.

### 4.3 Порівняння SDR

Існує велика кількість SDR-пристроїв, що можна придбати: Ettus Research USRP B210, LimeSDR Mini, HackRF One, RTL-SDR Blog V3, PlutoSDR, Red Pitaya, ADALM-PLUTO, KiwiSDR, та багато інших (таб. 4.1).

Таблиця 4.1 – Порівняльна характеристика різних моделей програмно-визначеного радіо (SDR)

Характеристика	Ettus Research USRP B210	LimeSDR Mini	HackRF One	AirSpy Mini	RTL-SDR Blog V3	BladeRF 2.0 micro	PlutoSDR	Red Pitaya	ADALM-PLUTO	KiwiSDR
Частотний діапазон	70 МГц - 6 ГГц	10 МГц - 3.5 ГГц	1 МГц - 6 ГГц	24 МГц - 1.8 ГГц	24 МГц - 1.76 ГГц	300 МГц - 3.8 ГГц	325 МГц - 3.8 ГГц	300 МГц - 3.5 ГГц	70 МГц - 6 ГГц	10 кГц - 30 МГц
Ширина смуги	56 МГц	30.72 МГц	20 МГц	10 МГц	2.4 МГц	56 МГц	61.44 МГц	50 МГц	61.44 МГц	10 МГц
Розрядність АЦП	12 біт	12 біт	8 біт	12 біт	8 біт	12 біт	12 біт	14 біт	12 біт	12 біт
Розрядність ЦАП	14 біт	12 біт	8 біт	-	-	12 біт	14 біт	14 біт	12 біт	-
Інтерфейс	USB 3.0	USB 3.0	USB 2.0	USB 2.0	USB 2.0	USB 3.0	USB 3.0	Ethernet	USB 2.0	Ethernet
Ціна (орієнтовна)	\$1,225	\$200	\$300	\$180	\$30	\$420	\$220	\$330	\$270	\$200

Ettus Research USRP B210: Це високопродуктивний програмно-визначуваний радіопристрій (SDR), призначений для професійного використання. Він має широкий частотний діапазон від 70 МГц до 6 ГГц та високу ширину смуги 56 МГц, що дозволяє працювати з різноманітними сигналами. Висока розрядність АЦП (12 біт) та ЦАП (14 біт) забезпечує відмінну якість сигналу та динамічний діапазон. Швидкий інтерфейс USB 3.0 дозволяє передавати великі обсяги даних. USRP B210 ідеально підходить для наукових досліджень, розробки прототипів, випробувань та вимірювань у сфері радіозв'язку [49].

LimeSDR Mini: Цей компактний та доступний SDR пристрій є чудовим вибором для навчання, експериментів та радіоаматорства. Він підтримує повний дуплекс, що дозволяє одночасно приймати та передавати сигнали. Частотний діапазон LimeSDR Mini становить 10 МГц - 3.5 ГГц, а ширина смуги - 30.72 МГц. Розрядність АЦП та ЦАП - 12 біт. Пристрій підключається до комп'ютера через USB 3.0 [50].

AirSpy Mini: Цей високоякісний SDR приймач призначений для радіомоніторингу та радіоаматорства. Він має високу чутливість та низький рівень шумів, що дозволяє приймати слабкі сигнали. Частотний діапазон AirSpy Mini становить 24 МГц - 1.8 ГГц, а ширина смуги - 10 МГц. Розрядність АЦП - 12 біт. Пристрій підключається до комп'ютера через USB 2.0 [51].

RTL-SDR Blog V3: Це простий та доступний SDR приймач, який ідеально підходить для початківців та радіоаматорів. Він має обмежений частотний діапазон (24 МГц - 1.766 ГГц) та ширину смуги (2.4 МГц), але є дуже доступним за ціною. Розрядність АЦП - 8 біт. RTL-SDR Blog V3 підключається до комп'ютера через USB 2.0 [52].

BladeRF 2.0 micro: Це відкритий SDR пристрій з підтримкою передачі та прийому, схожий на HackRF One, але з деякими покращеннями. Він має частотний діапазон від 300 МГц до 3.8 ГГц та ширину смуги 56 МГц. Розрядність АЦП та ЦАП - 12 біт. BladeRF 2.0 micro підключається до комп'ютера через USB 3.0 [53].

PlutoSDR: Це доступний SDR пристрій з вбудованим FPGA для прискорення обробки сигналів. Він має частотний діапазон від 325 МГц до 3.8 ГГц та ширину смуги 61.44 МГц. Розрядність АЦП - 12 біт, а ЦАП - 14 біт. PlutoSDR підключається до комп'ютера через USB 3.0 [54].

Red Pitaya: Це багатофункціональний пристрій з відкритим вихідним кодом, який може бути використаний як осцилограф, генератор сигналів, логічний аналізатор та спектроаналізатор. Він має частотний діапазон від 300 МГц до 3.5 ГГц та ширину смуги 50 МГц. Розрядність АЦП та ЦАП - 14 біт. Red Pitaya підключається до комп'ютера через Ethernet [55].

ADALM-PLUTO: Це портативний SDR пристрій, призначений для навчання та експериментів. Він схожий на PlutoSDR, але має меншу потужність та менший частотний діапазон (70 МГц - 6 ГГц). Ширина смуги становить 61.44 МГц. Розрядність АЦП та ЦАП - 12 біт. ADALM-PLUTO підключається до комп'ютера через USB 2.0 [56].

KiwiSDR: Це мережевий SDR приймач, призначений для радіомоніторингу та радіоаматорства. Він дозволяє віддалений доступ до даних через веб-інтерфейс. KiwiSDR має частотний діапазон від 10 кГц до 30 МГц та ширину смуги 10 МГц. Розрядність АЦП - 12 біт. Пристрій підключається [57].

Як видно з наведеної вище таблиці, HACK-RF є дешевою платформою, поступаючись лише кільком пристроям. Також HackRF виділяє те, що вона є єдиною повністю відкритою платформою. Саме тому HACK-RF було обрано як платформу для прототипування [58], [59].

#### 4.4 Технічні характеристики HackRF

HackRF One відрізняється відкритою архітектурою, що надає розробникам повний доступ до схем, прошивки та програмного забезпечення. Це дозволяє глибоко аналізувати роботу пристрою, модифікувати його та адаптувати під специфічні вимоги проекту, що є особливо цінним при прототипуванні.

Діапазон HackRF One від 1 МГц до 6 ГГц охоплює більшість популярних радіочастотних смуг, включаючи ISM, GSM, 3G, 4G, GPS, Wi-Fi та Bluetooth. Це робить його універсальним інструментом для прототипування різноманітних радіосистем, від простих радіомаяків до складних систем зв'язку та радіолокації.

Функціональність HackRF One визначається програмним забезпеченням, що надає високу гнучкість у налаштуванні параметрів роботи, таких як частота, модуляція, ширина смуги тощо. Це дозволяє швидко тестувати різні конфігурації та оптимізувати продуктивність системи без необхідності втручання в апаратну частину.

HackRF One підтримує як прийом, так і передачу сигналів, що робить його повноцінним інструментом для розробки радіосистем. Це дозволяє створювати прототипи передавачів, приймачів та трансиверів, що працюють у різних режимах та з різними типами модуляції.



Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд HackRf One [60]

На рисунку 4.2 зображено блок-схему приймальної частини програмно-конфігурованого радіоприймача HackRF One SDR. Пристрій працює в широкому діапазоні частот від 1 МГц до 6 ГГц, і його приймальна частина складається з декількох ключових компонентів:

1. Вхід SMA (SMA input) - Це роз'єм для підключення антени, яка приймає радіочастотний сигнал з ефіру. Тип антени може бути обраний користувачем в залежності від конкретних потреб та діапазону частот, що цікавить.

2. Підсилювач РЧ (RF Amp) - Цей компонент посилює слабкий вхідний радіочастотний сигнал до рівня, достатнього для подальшої обробки.

3. Фільтр низьких частот (LPF) та Фільтр високих частот (HPF) - Ці фільтри використовуються для вибору потрібного діапазону частот. LPF пропускає сигнали з частотами нижче певного порогу, а HPF - вище певного порогу. Вибір фільтра залежить від конкретного завдання та частотного діапазону, в якому працює користувач.

4.  $90^\circ$  (Зсув фази на  $90$  градусів) - Цей компонент зсуває фазу однієї з гілок сигналу на  $90$  градусів відносно іншої. Це необхідно для створення квадратурних складових сигналу (I та Q).

5. Квадратурний змішувач (I та Q) - Цей компонент розділяє вхідний сигнал на дві складові - синфазну (I) та квадратурну (Q), змішуючи його з сигналом гетеродина, що подається з генератора LO. Це дозволяє отримати інформацію про амплітуду та фазу сигналу, що необхідно для подальшої цифрової обробки.

6. Гетеродин (LO) - Це генератор, який створює сигнал з частотою, близькою до частоти вхідного сигналу. Змішування вхідного сигналу з сигналом гетеродина дозволяє перенести сигнал на нижчу проміжну частоту (ПЧ), зручнішу для подальшої обробки. Частота гетеродина керується за допомогою фазової автопідстроювання частоти (PLL) та генератора, керованого напругою (VCO), які забезпечують стабільність та точність частоти.

7. Аналогово-цифровий перетворювач (ADC) - Цей компонент перетворює аналоговий сигнал ПЧ на цифровий, який може бути оброблений програмним забезпеченням. HackRF One використовує 8-бітний АЦП з діапазоном до  $22$  МГц, але максимальна частота дискретизації SDR обмежена  $20$  МГц.

8. Цифровий потік (Baseband) - Оцифрований сигнал передається на комп'ютер через USB-інтерфейс для подальшої обробки, аналізу та запису.

На відміну від HackRF One, деякі інші SDR-пристрої, такі як RTL, використовують нижчу проміжну частоту (ПЧ), що забезпечує кращу вибірковість, але може призводити до більших відгуків зображення

змішувача. Вибір оптимальної ПЧ є компромісом між вибірковістю та відгуком зображення.

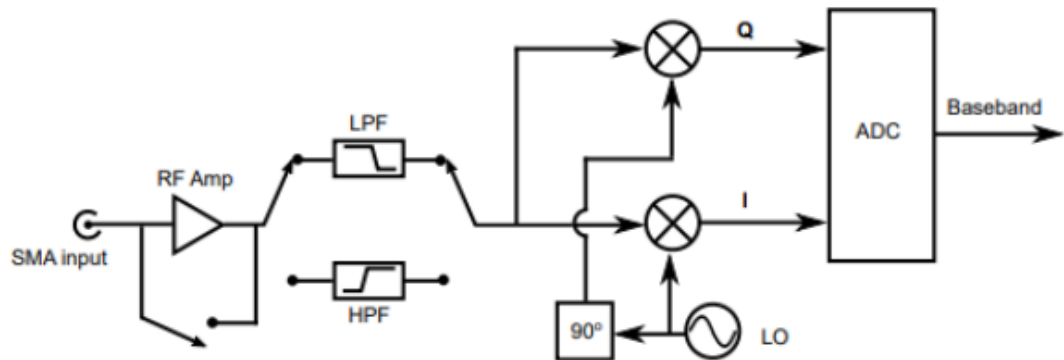


Рисунок 4.2 – Блок-схема сторони прийому HackRF One [61]

#### 4.5 Результати експерименту

Використовуючи алгоритм, наведений у розділі 3.6, була написана програма, для побудови спектрограми, на мові програмування python. Для відлагодження програми, та більш чіткої спектрограми було використано портативний генератор сигналів.

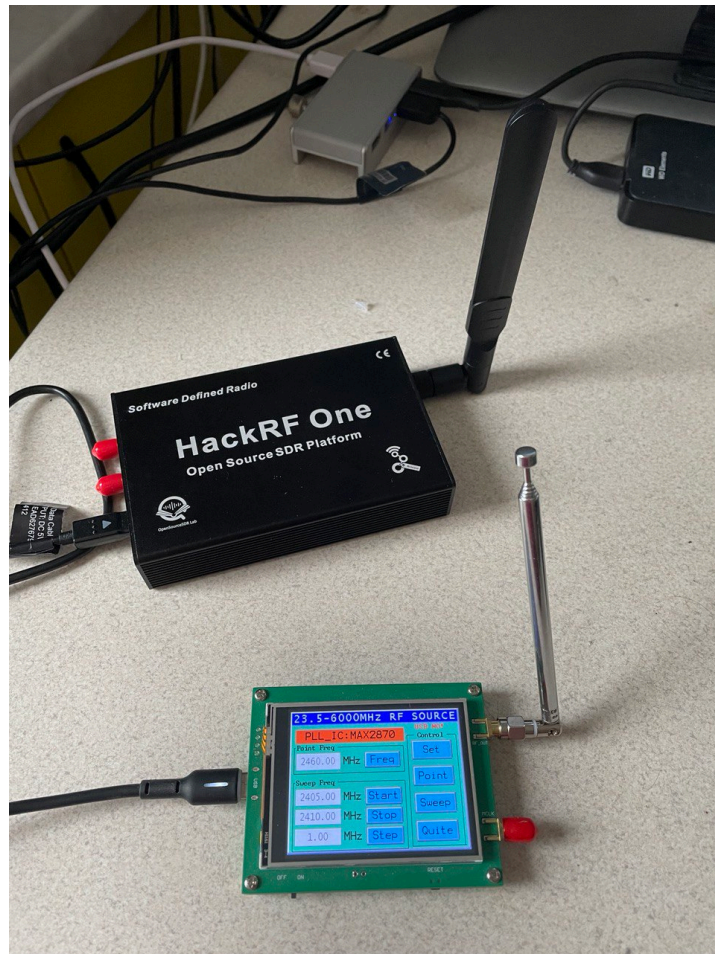


Рисунок 4.3 – Фото експериментального стенду

З генератора сигналів, було подано два різних види сигналів. Перший сигнал являв собою просту несучу частоту, яка є постійною і не змінюється з часом. Такий сигнал дозволяє протестувати базові функції вимірювача-аналізатора та оцінити його здатність точно визначати та вимірювати постійні частотні компоненти. Другий сигнал було створено за допомогою свіп-генератора, який працював у певній смузі частот. Цей генератор перемикав частоту з кроком 1 МГц, симулюючи сигнал з ортогональним частотним мультиплексуванням (OFDM).

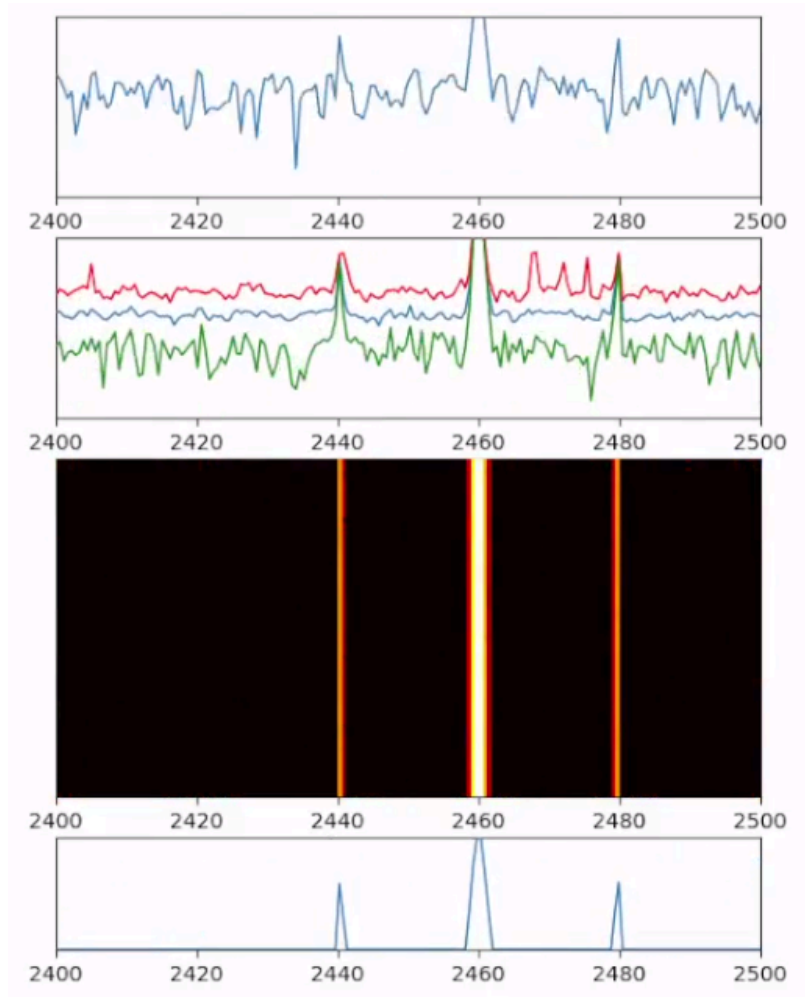


Рисунок 4.4 – Аналіз сигналу з однією несучою частотою

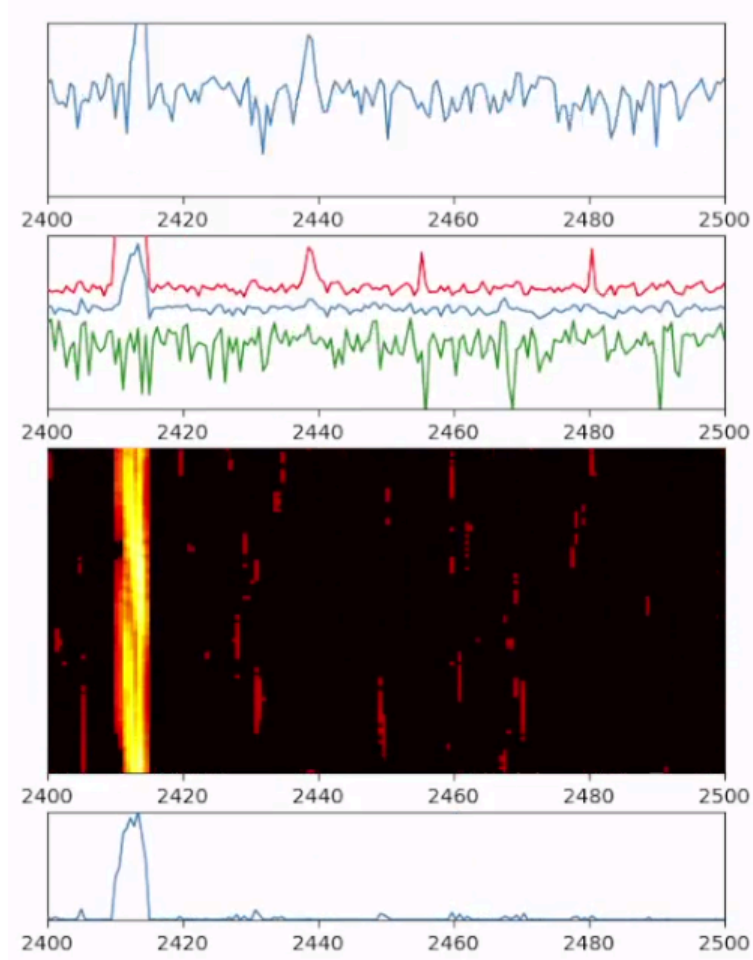


Рисунок 4.5 – Аналіз симуляції OFDM сигналу

На рисунках 4.4 та 4.5 представлені результати вимірювань та аналізу сигналів. На кожному рисунку послідовно зображено наступні візуалізації:

Живий спектр - графічне зображення поточного спектру сигналу, який аналізується в режимі реального часу. Він показує розподіл потужності сигналу по частотах, дозволяючи спостерігати зміну частотних компонентів у режимі реального часу.

Мінімальні, максимальні та усереднені значення сигналу для кожного біна за певний період часу. Цей графік дозволяє отримати уявлення про зміну потужності сигналу та його варіації з часом.

Водоспад - це спектрограма, яка зображує зміни частотних компонентів сигналу з часом. Кожна горизонтальна лінія представляє спектр сигналу в

певний момент часу, а зміни кольору вказують на зміну інтенсивності або потужності сигналу.

Гістограма - показує розподіл значень потужності сигналу для кожного біна за певний період часу. Вона надає можливість побачити частоту появи різних значень потужності та ідентифікувати характерні частоти або рівні сигналу.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи проведено ґрунтовне дослідження методів отримання та обробки спектрограм радіосигналів, що дозволило глибше зрозуміти особливості аналізу сигналів у частотно-часовій області та виявити оптимальні підходи для вирішення поставлених завдань. Проаналізовано асортимент апаратного забезпечення для програмно керованого радіо (SDR), що дозволило вибрати платформу HackRF як найбільш підходящу для прототипування та подальшої розробки. Визначено оптимальні налаштування вимірювальної платформи HackRF, що забезпечують ефективну детекцію більшості передавачів безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що є важливим кроком у створенні надійної системи виявлення БПЛА. Розроблено алгоритм та програмне забезпечення для візуалізації та автоматизованого аналізу спектрограм радіосигналів у реальному часі, що дозволяє оперативно виявляти та ідентифікувати сигнали БПЛА та інших джерел радіовипромінювання. Створено та успішно протестовано лабораторний стенд, який підтвердив працездатність розробленого алгоритму та програмного забезпечення, а також дозволив провести вимірювання та аналіз реальних радіосигналів. Отримані результати роботи використані для подальшої розробки детектора передавачів БПЛА, що має важливе практичне значення для забезпечення безпеки та контролю повітряного простору. Загалом, результати дипломної роботи демонструють значний прогрес у галузі аналізу спектрограм радіосигналів та їх застосування для виявлення БПЛА. Розроблений алгоритм та програмне забезпечення мають потенціал для використання у реальних системах безпеки та моніторингу, що підтверджує актуальність та практичну цінність проведеного дослідження.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бойко, Владислав, and Леонід Заміховський. "Дослідження діагностичних ознак вібраційного стану газперекачувального агрегату." *Основні напрямки роботи Секція* (2023): 235.
2. Бондарчук, Єгор Олександрович. "Засіб для зниження рівня шумів з рівномірним розподілом у сигналах звукових частот." URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/items/aecc8e98-ab03-44ed-a0ac-86535cc11695>
3. Жук, Л. О., and В. Ф. Сураєв. "СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА МЕТОДІВ ОБРОБКИ ДАНИХ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ ТА СТРУКТУРИ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ." *Proceedings of National Aviation University* 13.2: 26-31.
4. Заїка, Володимир Іванович, and Василь Дмитрович Кишенько. *Використання вейвлет-аналізу для дослідження часових рядів якісних параметрів роботи станції дефекосатурації цукрового заводу*. Diss. 2011.
5. Коваль, Д. О., and О. А. Коваль. "Методика досліджень вібрацій з використанням спектрограм." URL: [https://www.researchgate.net/profile/Nikita-Zdoryk/publication/375450897\\_SINTEZ\\_MODELI\\_PRIJNATTA\\_RISEN\\_PRI\\_PROEKTUVANNI\\_KOMP'UTERNO-INTEGROVANIH\\_VIROBNICIH\\_PROCESIV/links/654aab5d3fa26f66f4e27a82/SINTEZ-MODELI-PRIJNATTA-RISEN-PRI-PROEKTUVANNI-KOMPUTERNO-INTEGROVANIH-VIROBNICIH-PROCESIV.pdf#page=182](https://www.researchgate.net/profile/Nikita-Zdoryk/publication/375450897_SINTEZ_MODELI_PRIJNATTA_RISEN_PRI_PROEKTUVANNI_KOMP'UTERNO-INTEGROVANIH_VIROBNICIH_PROCESIV/links/654aab5d3fa26f66f4e27a82/SINTEZ-MODELI-PRIJNATTA-RISEN-PRI-PROEKTUVANNI-KOMPUTERNO-INTEGROVANIH-VIROBNICIH-PROCESIV.pdf#page=182)
6. Даник, Ю. Г., and М. В. Бугайов. "Частотно-часовий аналіз акустичного випромінювання тактичних безпілотних літальних апаратів." *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем* 12 (2015): 5-17.

7. Семенов, Б. С., and І. В. Шелевицький. "Частотно-часовий фільтр зі статистичною ранговою селекцією коефіцієнтів." *Відбір і обробка інформації* 41 (2014): 36-42.
8. Бочарніков, В. П. "Частотно-часовий аналіз сигналів на основі функцій поведінки і арифметичних рядів: дослідження працездатності методу." *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ імені Івана Черняхівського* (2019): 98-103.
9. Колобродов, Валентин Георгійович, Григорій Семенович Тимчик, and Микита Сергійович Колобродов. "Когерентні оптичні спектроаналізатори." URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/387623ef-d10c-4056-8701-4b5c04bcd676/download>
10. Гісцев, А. Ю. "Алгоритми розпізнавання акустичних сигналів БПЛА." URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/39fd2211-519a-419c-9f59-be1eb2584fc6>
11. Собко, Іван Олександрович. "Розпізнавання мови з використанням спектрограм та глибинного навчання." URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/43b66cda-16bf-4df7-9fe4-4635b6b29edc/download>
12. Трачук, Зоряна Артурівна. "Програмно-технічний засіб для обробки звукових сигналів" URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/items/445c040a-f667-450b-b662-ef73f2ffcb72>
13. Бережна, Ольга Володимирівна, Н. Н. Басова, and А. А. Горлач. *Побудова системи передачі для каналів зв'язку з різним рівнем переешкод*. Diss. Вид-во СумДУ, 2009.
14. Муляр, І. В., Є. С. Ленков, and Л. В. Солодєєва. "Шифрування звуку методом представлення його у вигляді спектрограми." *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка* 51 (2016): 177-185.

15. Tektronix. Guide to Real Time Spectrum Analysis. URL: [https://www.tehencom.com/Categories/Spectrum\\_Signal\\_Analyzers/Theory/Tektronix\\_Guide\\_to\\_Real\\_Time\\_Spectrum\\_Analysis.pdf](https://www.tehencom.com/Categories/Spectrum_Signal_Analyzers/Theory/Tektronix_Guide_to_Real_Time_Spectrum_Analysis.pdf).

16. TinySA. Technical Description. URL: <https://tinysa.org/wiki/pmwiki.php?n=Main.TechnicalDescription>.

17. MathWorks. Spectrogram Computation in Signal Analyzer. URL: <https://www.mathworks.com/help/signal/ug/spectrogram-computation-in-signal-analyzer.html>.

18. Заміховський, Л. М., Н. І. Іванюк, and В. В. Павлик. "Використання вейвлет-перетворення для визначення технічного стану газоперекачувальних агрегатів." (2017).

19. Онанченко, Євген Леонідович, і Д. В. Кетов. *Вибір та дослідження циклічних кодів для систем передачі даних*. Diss. Вид-во СумДУ, 2009.

20. Докашенко, Н. С. Пристрій маршрутизації та передачі даних у мережі Ethernet . Diss. Видавництво СумДУ, 2009.

21. Налбандова, Вікторія Павлівна. *Моделювання цифрового когерентного оптичного спектроаналізатора*. MS thesis. Київ, 2019.

22. Бугайов, М. В. "Частотно-часовий матричний метод виявлення радіосигналів зі стрибкоподібною зміною робочої частоти в складній сигнальній обстановці." *ВЧЕНІ ЗАПИСКИ* (2019): 3201961.

23. Кірей, К. О. "ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ АКУСТИЧНОГО ВІДБИТКА ЩОДО ІДЕНТИФІКАЦІЇ МЕДІАКОНТЕНТУ." *ВЧЕНІ ЗАПИСКИ* URL: [https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/4\\_2021/4\\_2021.pdf#page=9](https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/4_2021/4_2021.pdf#page=9)

24. Стеценко, М. О., Ю. О. Єфименко, and І. Т. Богданов. "Аналіз спектрів сигналів засобами програмного комплексу Matlab Wavelet Toolbox." URL:

25. Колобродов, Валентин Георгійович, et al. "Проектування цифрових когерентних оптичних спектроаналізаторів." URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/26825/1/Monografia\\_2019.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/26825/1/Monografia_2019.pdf)
26. Савіцький, О., and Л. Дедів. "Дослідження та побудова спектрограм голосних звуків мовного сигналу." *Матеріали VIII студентської науково-технічної конференції „Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання“* (2005): 93-93.
27. Протасова, Тетяна Олександрівна, І. М. Корчан. *Адаптивна система передачі на основі циклічних кодів*. Diss. Вид-во СумДУ, 2009.
28. FFTW. FFTW3 Documentation. URL: [https://fftw.org/fftw3\\_doc/](https://fftw.org/fftw3_doc/).
29. MathWorks. Persistence Spectrum in Signal Analyzer. URL: <https://www.mathworks.com/help/signal/ug/persistence-spectrum-in-signal-analyzer.html>.
30. Бочарніков, В. П. "Частотно-часовий аналіз сигналів на основі функцій поведінки і арифметичних рядів." *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського* 3 (2018): 103-115.
31. Бодовський, ВЛАДИСЛАВ ДМИТРОВИЧ. "Дослідження математичних моделей та методів аналізу аудіосигналу." *Кваліфікаційні магістерські роботи* URL: <https://jqmth.donnu.edu.ua/article/download/15189/15098>
32. Станкевич, С. А., О. В. Титаренко, and С. В. Шкляр. "Ефективна обробка даних польового спектрометрування в природоресурсних задачах." *Доповіді НАН України* (2010).
33. Wikipedia. Waterfall FM Broadcast. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Waterfall\\_FM\\_Broadcast.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Waterfall_FM_Broadcast.jpg)
34. Станіславський, Юрій Владиславович. "Частотно-часовий аналіз біомедичних сигналів." URL: <https://ela.kpi.ua/items/a43ed8d4-9b3f-45af-9078-e20d17a5a62c>

35. Кухарчук, В. В., and С. Ш. Каців. "Частотно-часовий аналіз вібросигналів з використанням вейвлет-перетворень." *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології* URL: <http://dspace.nbuiv.gov.ua/handle/123456789/32215>
36. Розяєв, Юрій Дмитрович. *Фільтрація сигналів на основі обробки спектрограм нейронними мережами*. BS thesis. КПІ імені Ігоря Сікорського, 2022.
37. BPSK spectrum with a 24Kbits/s baud rate and IF 445 kHz. ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/figure/BPSK-spectrum-with-a-24Kbits-s-baud-rate-a-and-IF-445-kHz-Horizontal-scale-20kHz-div\\_fig4\\_29601753](https://www.researchgate.net/figure/BPSK-spectrum-with-a-24Kbits-s-baud-rate-a-and-IF-445-kHz-Horizontal-scale-20kHz-div_fig4_29601753).
38. Tea and Tech Time. Python Intensity Graded FFT Plots. URL: <https://teaandtechtime.com/python-intensity-graded-fft-plots/>.
39. The Normalized Spectrum of the QPSK Modulated Transmit RF Signal with Carrier Frequency. ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/figure/The-Normalized-spectrum-of-the-QPSK-modulated-transmit-RF-signal-with-carrier-frequency\\_fig3\\_242093061](https://www.researchgate.net/figure/The-Normalized-spectrum-of-the-QPSK-modulated-transmit-RF-signal-with-carrier-frequency_fig3_242093061)
40. Spectrum of 4D-8PSK-TCM Transmission Signal. ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Spectrum-of-4D-8PSK-TCM-transmission-signal-when-roll-off-factor-of-SRRC-Tx-filter-is-035\\_fig2\\_331031838](https://www.researchgate.net/figure/Spectrum-of-4D-8PSK-TCM-transmission-signal-when-roll-off-factor-of-SRRC-Tx-filter-is-035_fig2_331031838)
41. The 16-QAM Modulated Signal Spectrum at 60 GHz. ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/figure/a-The-16-QAM-modulated-signal-spectrum-at-60-GHz-b-Frequency-down-converted-QAM\\_fig6\\_289863895](https://www.researchgate.net/figure/a-The-16-QAM-modulated-signal-spectrum-at-60-GHz-b-Frequency-down-converted-QAM_fig6_289863895).
42. Поляков, Олександр Юрійович, Борис Костянтинович Лопатченко, і Олександр Андрійович Любивий. *Вплив перешкод у цифрових системах передачі мовної інформації*. Diss. Вид-во СумДУ, 2009.

43. Frequency Comb Spectra. ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/figure/a-Frequency-comb-spectra-Dashed-even-subcarriers-Dotted-odd-subcarriers-Solid-all\\_fig2\\_221774691](https://www.researchgate.net/figure/a-Frequency-comb-spectra-Dashed-even-subcarriers-Dotted-odd-subcarriers-Solid-all_fig2_221774691).
44. de Estevez, D. OFDM Tag. URL: <https://destevez.net/tag/ofdm/>.
45. MathWorks. Bluetooth Low Energy Waveform Generation and Visualization. URL: <https://www.mathworks.com/help/bluetooth/ug/bluetooth-low-energy-waveform-generation-and-visualization.html>.
46. Characteristics of the Bluetooth Signal. ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/figure/Characteristics-of-the-Bluetooth-signal-a-the-25-MHz-wide-spectrogram-of-the-Bluetooth\\_fig6\\_319815109](https://www.researchgate.net/figure/Characteristics-of-the-Bluetooth-signal-a-the-25-MHz-wide-spectrogram-of-the-Bluetooth_fig6_319815109).
47. SDR и HackRF для начинающих. Hackware. URL: <https://hackware.ru/?p=8249>.
48. Программно обумовлена радіосистема. Wikipedia. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Программно\\_определяемая\\_радиосистема](https://ru.wikipedia.org/wiki/Программно_определяемая_радиосистема).
49. Pothosware. SoapySDR. URL: <https://github.com/pothosware/SoapySDR/wiki>
50. HackRF. HackRF One. URL: [https://hackrf.readthedocs.io/en/latest/hackrf\\_one.html](https://hackrf.readthedocs.io/en/latest/hackrf_one.html)
51. Ettus Research. USRP B210 Manual. URL: <https://files.ettus.com/manual/>.
52. Lime Micro. LimeSDR Mini. URL: <https://www.crowdsupply.com/lime-micro/limesdr-mini>.
53. Airspy. Airspy Mini. URL: <https://airspy.com/airspy-mini/>.
54. Osmocom. RTL-SDR. URL: <https://osmocom.org/projects/rtl-sdr/wiki>.
55. Nuand. BladeRF. URL: <https://www.nuand.com/>.
56. Analog. GNU Radio. URL: <https://wiki.analog.com/resources/tools-software/linux-software/gnuradio>.
57. Red Pitaya. URL: <https://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/>.
58. <https://wiki.analog.com/resources/tools-software/linux-software/gnuradio>
59. KiwiSDR. URL: <http://kiwisdr.com>.

60. Немного про устройство современного радио на примере HackRF One.  
Habr. URL: <https://habr.com/ru/post/499376/>.
61. Передача радиосигналов с помощью HackRF. Habr. URL:  
<https://habr.com/ru/post/372177/>.

## ДОДАТОК А

## Програмний код

```
#!/usr/bin/env python3

import os, sys
import time
from matplotlib import pyplot as plt, cm
from matplotlib.gridspec import GridSpec
import numpy as np
import threading
import queue
import io
import subprocess
from datetime import date
import time
from dateutil import parser

DBMIN=-100
DBMAX=10

q = queue.Queue()

def process_plot(fmin, fmax, nbins, tbins):
    ns = 0
    while True:
        tb = time.time()
```

```

try:
    (ts,adata) = q.get(block=False, timeout=0.2)
    if adata is None:
        continue
    if ns == 0:
        nbins = len(adata)
        fig = plt.figure(figsize=(8,9))
        plt.rcParams["font.family"] = "monospace"
        gs = GridSpec(nrows=4, ncols=1, figure=fig, height_ratios=[0.8,
0.8, 1.5, 0.5])
        asp2 = fig.add_subplot(gs[0,0])
        aspa = fig.add_subplot(gs[1,0])
        awfl = fig.add_subplot(gs[2,0])
        ahis = fig.add_subplot(gs[3,0])

        ptxt = asp2.set_title("")

        af = np.linspace(fmin, fmax, nbins)
        at = np.linspace(0, tbins, tbins)
        Z = np.zeros([tbins, nbins]) - 120
        AZ = np.zeros([tbins, nbins]) - 120

        zmin = DBMIN
        zmax = DBMAX

        azmin = []
        azmax = []
        azsz = 20

        psp2, = asp2.plot(af, np.zeros(nbins) - 120, lw=1)

```

```

asp2.axes.get_yaxis().set_visible(False)
asp2.set_xlim(af.min(), af.max())
asp2.set_ylim(zmin, zmax)
asp2.margins(x=0)

```

```

pspa, = aspa.plot(af, np.zeros(nbins) - 120, lw=1)
pspx, = aspa.plot(af, np.zeros(nbins) - 120, 'r', lw=1)
pspn, = aspa.plot(af, np.zeros(nbins) - 120, 'g', lw=1)
aspa.axes.get_yaxis().set_visible(False)
aspa.set_xlim(af.min(), af.max())
aspa.set_ylim(zmin, zmax)
aspa.margins(x=0)

```

```

        pwfl = awfl.pcolorfast(af, at, Z, vmin=0, vmax=1,
cmap="plasma")

```

```

awfl.axes.get_yaxis().set_visible(False)

```

```

phis, = ahis.plot(af, np.zeros(nbins) - 120, lw=1)
ahis.axes.get_yaxis().set_visible(False)
ahis.set_xlim(af.min(), af.max())
ahis.set_ylim(0, 1)
ahis.margins(x=0)

```

```

ws = 20;

```

```

shold = np.zeros([ws, nbins])
davg = np.zeros(nbins)
dmin = np.zeros(nbins)
dmax = np.zeros(nbins)

```

```
plt.show(block=False)
plt.pause(0.1)
```

```
ab = fig.canvas.copy_from_bbox(fig.bbox)
asp2.draw_artist(psp2)
aspa.draw_artist(pspa)
aspa.draw_artist(pspx)
aspa.draw_artist(pspn)
aspa.draw_artist(phis)
awfl.draw_artist(pwfl)
asp2.draw_artist(ptxt)
```

```
fig.canvas.blit(fig.bbox)
```

```
ns += 1
```

```
except queue.Empty:
```

```
    if ns == 0:
```

```
        continue
```

```
azk = 0
```

```
azmin.append(adata.min() * (1.1 if adata.min() < 0 else 0.9))
```

```
azmax.append(adata.max() * (1.1 if adata.max() > 0 else 0.9))
```

```
if len(azmin) > azsz:
```

```
    azmin = azmin[:azsz]
```

```
if len(azmax) > azsz:
```

```
    azmax = azmax[:azsz]
```

```

if len(azmin) >= azsz:
    wmin = min(azmin)
    wmax = max(azmax)
    if wmin != zmin and np.abs(zmin - wmin) > 3:
        zmin = wmin
        azk += 1
    if wmax != zmax and np.abs(zmax - wmax) > 3:
        zmax = wmax
        azk += 1
    if zmin < DBMIN:
        zmin = DBMIN
    if zmax > DBMAX:
        zmax = DBMAX

if azk > 0:
    asp2.set_ylim(zmin, zmax)
    aspa.set_ylim(zmin, zmax)

Z = np.insert(Z, 0, adata, axis=0)
Z = np.delete(Z, Z.shape[0]-1, axis=0)

shold = np.insert(shold, 0, adata, axis=0)
shold = np.delete(shold, shold.shape[0]-1, axis=0)

davg = np.array([np.mean(shold[:,i]) for i in range(shold.shape[1])])
dmax = np.array([np.max(shold[:,i]) for i in range(shold.shape[1])])
dmin = np.array([np.min(shold[:,i]) for i in range(shold.shape[1])])

AZ = np.insert(AZ, 0, davg, axis=0)
AZ = np.delete(AZ, AZ.shape[0]-1, axis=0)

```

```
NZ = ( AZ - AZ.min() ) / ( AZ.max() - AZ.min() )

tk = 0.2
tr = True

if tr:
    azt = np.percentile(NZ,0.75)
    azt += (NZ.max() - azt)*tk
    NZ[NZ<azt] = 0
dhis = np.array([np.sum(NZ[:,i]) for i in range(NZ.shape[1])])
dhis = (dhis - dhis.min())/(dhis.max() - dhis.min())

psp2.set_ydata(adata)
pspa.set_ydata(davg)
pspx.set_ydata(dmax)
pspn.set_ydata(dmin)
phis.set_ydata(dhis)
pwfl.set_data(NZ)

fig.canvas.restore_region(ab)

asp2.draw_artist(psp2)
aspa.draw_artist(pspa)
aspa.draw_artist(pspx)
aspa.draw_artist(pspn)
aspa.draw_artist(phis)
```

```

awfl.draw_artist(pwfl)

tc = time.time()
    ptxt.set_text("FPS: %3d, Latency: %6.1f ms, Queue: %4d" %
(int(1/(tc-tb)),(tc-ts)*1000, q.qsize()))
    asp2.draw_artist(ptxt)

fig.canvas.blit(fig.bbox)
fig.canvas.flush_events()
ns += 1

def process_sweep(fmin, fmax, df):
#hackrf_sweep -f 2400:2500 -w 600000
    dst = str(date.today())
    flow = False
    adata = np.array([])
    ffmin = fmin * 1000000
    ffmax = fmax * 1000000
    npt = int((ffmax-ffmin)/df)
    print([ffmin,ffmax,npt])
    scnt = 0.0
    sdt = 0.9
    sdvd = 2.9
    try:
        proc = subprocess.Popen(["hackrf_sweep", "-f", "%s:%s" % (fmin,
fmax),
"-w", str(df)],
stdout=subprocess.PIPE,
stderr=subprocess.DEVNULL)
        for line in io.TextIOWrapper(proc.stdout, encoding="utf-8"):

```

```

if not line.startswith(dstr):
    continue
a = line.split(",")
f1 = int(float(a[2]))
f2 = int(float(a[3]))
ns = int(float(a[5]))
dff = float(a[4])
dd = list(map(float,a[6:]))
ts = "%s %s" % ( a[0], a[1] )
if f1 == fmin:
    adata = np.array([])
    adata = np.append(adata,dd)
    flow = True
    continue
if flow:
    if f2 == fmax:
        adata = np.append(adata,dd)
        #print("SWEEP: ", len(adata))
        #sys.stdout.flush()
        scnt += sdtl
        if scnt >= sdvd:
            t = parser.parse(ts).timestamp()
            q.put((t,adata))
            scnt = 0
            adata = np.array([])
            flow = False
        else:
            adata = np.append(adata,dd)
else:
    print("ERRSTR: ", a)

```

```
        sys.stdout.flush()
finally:
    proc.terminate()
    proc.kill()

if __name__ == "__main__":
    fmin = 2400
    fmax = 2500
    df = 600000
    nb = int((fmax-fmin)/(df/1000000.0))
    tb = 100
    print([nb, tb])
        threading.Thread(target=process_sweep, args=(fmin,fmax,df),
daemon=True).start()
    process_plot(fmin,fmax,nb,tb)
```