ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ ЗАВАД У БЕЗДРОТОВИХ КАНАЛАХ ЗВ'ЯЗКУ»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Нікіта БЕРЕЗЕЦЬКИЙ
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

Виконав: здобувач вищої освіти гр. ТСДМ-61
Нікіта БЕРЕЗЕЦЬКИЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: Дмитро МИРОНОВ
к.т.н. *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ*

Рецензент: _____
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Телекомунікацій

Кафедра ___Телекомунікаційних систем та мереж_____
Ступінь вищої освіти __магістр_____
Спеціальність ___172 Електронні комунікації та радіотехніка _____
Освітньо-професійна програма _____Телекомунікаційні системи та мережі_____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри __ТСМ_____
_____ Віктор ЗАЇКА
«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Березецькому Нікіті Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Вейвлет-аналіз для виявлення та фільтрації завад у бездротових каналах зв'язку
керівник кваліфікаційної роботи Дмитро МИРОНОВ, к.т.н.
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «30» 10. 2025 р. № 467

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
1. Вейвлет-аналіз.
2. Безпроводові мережі.
3. Підвищення завадостійкості каналів зв'язку.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Вейвлет-аналіз.
2. Використання безпроводових мереж.
3. Передача даних по зашумлених каналах.
4. Підвищення завадостійкості каналів зв'язку.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: ___презентація на ____слайдах_____

6. Дата видачі завдання «___» _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір та аналіз науково-технічної літератури	15.10.2025	Викон.
2	Розробка першого розділу	20.10.2025	Викон.
3	Розробка другого розділу	30.10.2025	Викон.
4	Розробка третього розділу	10.11.2025	Викон.
5	Розробка четвертого розділу	20.11.2025	Викон.
6	Висновки, вступ, реферат	30.11.2025	Викон.
7	Розробка презентації	10.12.2025	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Нікіта БЕРЕЗЕЦЬКИЙ
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Дмитро МИРОНОВ
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій
ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Березецький Н.С. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)
на тему: «Вейвлет-аналіз для виявлення та фільтрації завад у бездротових каналах зв'язку»

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Березецький Нікіта Сергійович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти новими комп'ютерними технологіями, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які були поставлені керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до наукової роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Березецького Нікіти Сергійовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Дмитро МИРОНОВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Березецький Н.С. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри телекомунікаційних систем та мереж _____ Віктор ЗАЇКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього ступеня магістра

здобувача вищої освіти Березецького Нікіти Сергійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)
на тему «Вейвлет-аналіз для виявлення та фільтрації завад у бездротових каналах зв'язку»

Актуальність.
Зростання кількості безпроводових мереж і обмеженість радіочастотного ресурсу призводять до ускладнення радіообстановки та підвищення рівня завад у безпроводових каналах зв'язку. Традиційні спектральні методи аналізу є малоефективними для нестаціонарних сигналів і короткочасних завад, характерних для реальних умов експлуатації. У цьому контексті актуальним є застосування вейвлет-аналізу, який забезпечує одночасну часово-частотну локалізацію сигналів та ефективне виявлення і фільтрацію завад. Використання вейвлет-аналізу дозволяє підвищити завадостійкість і надійність безпроводових телекомунікаційних систем.

Позитивні сторони.
1. У роботі проведено комплексний аналіз вейвлет-аналізу як ефективного методу обробки нестаціонарних сигналів у безпроводових каналах зв'язку.
2. У роботі було розглянуто практичні аспекти реалізації дискретного та безперервного вейвлет-перетворення з використанням сучасних програмних інструментів.

Недоліки.
1. Експериментальні дослідження виконано на модельних та тестових сигналах, що не повністю відображає різноманіття реальних умов експлуатації безпроводових каналів зв'язку.
2. Порівняння безпроводових технологій має узагальнений характер і не враховує специфічні реалізації протоколів різних виробників.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку магістерської кваліфікаційної роботи

Висновок: *кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра заслуговує оцінку "відмінно", а здобувач Березецький Нікіта Сергійович заслуговує присвоєння кваліфікації: магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.*

Рецензент
науковий ступінь, вчене звання _____ (підпис) _____ *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 79 стор., 39 рис., 24 джерела.

Мета роботи – дослідження можливостей вейвлет-аналізу для виявлення та фільтрації завад у безпроводових каналах зв’язку, а також оцінка його ефективності для підвищення завадостійкості та надійності передавання інформації в умовах нестаціонарної радіообстановки.

Об’єкт дослідження – безпроводові канали зв’язку та процеси передавання сигналів у телекомунікаційних системах за наявності шумів, імпульсних і взаємних завад.

Предмет дослідження – методи та алгоритми вейвлет-аналізу сигналів, що застосовуються для аналізу, виявлення та придушення завад у безпроводових каналах зв’язку.

Короткий зміст роботи: у кваліфікаційній роботі досліджено вейвлет-аналіз як ефективний метод виявлення та фільтрації завад у безпроводових каналах зв’язку в умовах ускладненої радіообстановки. Показано обмеженість класичних спектральних методів при аналізі нестаціонарних сигналів та імпульсних завад. Розглянуто дискретне і безперервне вейвлет-перетворення та особливості їх практичного застосування. Доведено ефективність вейвлет-аналізу для виявлення корисних сигналів на фоні шуму та підвищення завадостійкості приймального тракту. Проаналізовано сучасні безпроводові технології й обґрунтовано доцільність використання вейвлет-аналізу для підвищення надійності телекомунікаційних систем.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗ, ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ, БЕЗПРОВОДОВІ КАНАЛИ ЗВ’ЯЗКУ, ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ, НЕСТАЦІОНАРНІ СИГНАЛИ, ФІЛЬТРАЦІЯ ШУМУ, ІМПУЛЬСНІ ЗАВАДИ, ЧАСОВО-ЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ, РОЗШИРЕННЯ СПЕКТРА, БЕЗПРОВОДОВІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 79 pages, 39 figures, 24 sources.

The purpose of the work is to study the capabilities of wavelet analysis for detecting and filtering interference in wireless communication channels, as well as to assess its effectiveness for increasing noise immunity and reliability of information transmission in non-stationary radio environments.

Object of the study is wireless communication channels and signal transmission processes in telecommunication systems in the presence of noise, impulse and mutual interference.

Subject of the study is methods and algorithms for wavelet analysis of signals used for analyzing, detecting and suppressing interference in wireless communication channels.

Summary of the work: the qualification work investigates wavelet analysis as an effective method for detecting and filtering interference in wireless communication channels in a complex radio environment. The limitations of classical spectral methods in the analysis of non-stationary signals and impulse interference are shown. Discrete and continuous wavelet transforms and the features of their practical application are considered. The effectiveness of wavelet analysis for detecting useful signals against noise and increasing the noise immunity of the receiving path is proven. Modern wireless technologies are analyzed and the feasibility of using wavelet analysis to increase the reliability of telecommunication systems is substantiated.

KEYWORDS: WAVELET ANALYSIS, WAVELET TRANSFORM, WIRELESS COMMUNICATION CHANNELS, INTERFERENCE IMMUNITY, NON-STATIONARY SIGNALS, NOISE FILTERING, IMPULSE INTERFERENCE, TIME-FREQUENCY ANALYSIS, SPECTRUM SPREAD, WIRELESS TELECOMMUNICATION SYSTEMS

ЗМІСТ

ВСТУП 9
РОЗДІЛ 1 ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗ 11
1.1 Дискретне вейвлет – перетворення 11
1.2 Банк фільтрів та декомпозиція 21
1.3 Вейвлет скалограми 25
РОЗДІЛ 2 ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ 30
2.1 Ключові характеристики 30
2.2 Класифікація характеристик 32
2.3 Структура мережі та характер взаємодії вузлів 42
РОЗДІЛ 3 ПЕРЕДАЧА ДАНИХ ПО ЗАШУМЛЕНИХ КАНАЛАХ 50
3.1 Технології передачі даних 50
3.2 Методи кодування та декодування 54
3.3 Обмеження способу 59
РОЗДІЛ 4 ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ 63
4.1 Використання голографічного кодування для підвищення надійності каналу зв'язку 65
4.2 Голографічне кодування цифрового каналу 67
4.3 Спектральне голографічне кодування в аналоговому каналі 70
ВИСНОВКИ 78
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 80
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 82

ВСТУП

Стрімкий розвиток безпроводових систем зв’язку зумовив суттєве зростання їх ролі в сучасних телекомунікаціях. Безпроводові канали широко застосовуються в мережах доступу, системах передачі даних, телеметрії, промислових і спеціалізованих телекомунікаційних системах. Водночас розширення спектра застосувань супроводжується ускладненням радіообстановки, зростанням рівня шумів, взаємних і навмисних завад, а також впливом багатопроменевого поширення сигналів. У таких умовах забезпечення надійного та завадостійкого передавання інформації є однією з ключових проблем сучасних безпроводових технологій.

Традиційні методи аналізу та обробки сигналів, зокрема спектральні підходи на основі перетворення Фур’є, добре працюють для стаціонарних процесів, однак мають обмежену ефективність у разі нестаціонарних сигналів, імпульсних завад і короткочасних спотворень, характерних для реальних безпроводових каналів зв’язку. Це зумовлює необхідність застосування більш гнучких методів аналізу, здатних одночасно враховувати часові та частотні властивості сигналів.

Одним із таких методів є вейвлет-аналіз, який дозволяє виконувати багатомасштабний аналіз сигналів і забезпечує їх локалізацію в часово-частотній області. Завдяки цим властивостям вейвлет-перетворення є ефективним інструментом для виявлення завад, фільтрації шуму та виділення корисної інформації у безпроводових каналах зв’язку. Особливу цінність цей підхід має при роботі з низьким відношенням сигнал/шум, наявністю навмисних завад і складною структурою передаваних сигналів.

Актуальність теми даної кваліфікаційної роботи зумовлена необхідністю підвищення завадостійкості безпроводових каналів зв’язку шляхом поєднання вейвлет-аналізу з сучасними методами модуляції, кодування та розширення спектра. Зокрема, перспективним є використання вейвлет-аналізу разом із псевдовипадковими сигналами, OFDM-технологіями та голографічним кодуванням, що дозволяє суттєво підвищити надійність передавання інформації в умовах інтенсивних завад.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження можливостей вейвлет-аналізу для виявлення та фільтрації завад у безпроводових каналах зв’язку, а також оцінка його ефективності у поєднанні з сучасними завадостійкими методами передавання інформації. Досягнення поставленої мети дозволяє сформувати науково обґрунтовані рекомендації щодо застосування вейвлет-аналізу при проєктуванні та вдосконаленні сучасних безпроводових телекомунікаційних систем.

1 ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗ

1.1 Дискретне вейвлет – перетворення

Розглянемо дискретне вейвлет-перетворення (DWT), реалізоване в бібліотеці PyWavelets (версія 1.0.3). PyWavelets є безкоштовним програмним забезпеченням з відкритим вихідним кодом і поширюється за ліцензією MIT, що робить його зручним інструментом як для наукових досліджень, так і для практичних прикладних задач аналізу сигналів.

Під час комп'ютерної обробки сигналів зазвичай використовується дискретизована форма неперервного вейвлет-перетворення, теоретичні засади якого були розглянуті у попередніх роботах. Проте безпосереднє задання дискретних значень параметрів масштабування a та зсуву b з довільними кроками Δa і Δb призводить до суттєвого зростання обчислювальної складності. Такий підхід потребує виконання великої кількості операцій і значних обсягів пам'яті, що не завжди є доцільним з практичної точки зору.

Окрім цього, у результаті подібного дискретизування формується надмірна кількість вейвлет-коефіцієнтів, яка значно перевищує кількість відліків початкового сигналу. Більшість цих коефіцієнтів не є критично необхідними для точної реконструкції сигналу, а тому створюють лише зайве навантаження на обчислювальні ресурси.

На відміну від цього, дискретне вейвлет-перетворення (DWT), реалізоване в бібліотеці PyWavelets, забезпечує оптимальний компроміс між інформативністю та обчислювальною ефективністю. Воно надає достатній обсяг даних як для детального аналізу структури сигналу, так і для його подальшого синтезу або відновлення. При цьому DWT є значно економнішим за кількістю арифметичних операцій і вимогами до оперативної пам'яті, що робить його придатним для використання в системах реального часу та при обробці великих масивів даних.

Коли доцільно використовувати вейвлет-перетворення замість перетворення Фур'є

Перетворення Фур’є демонструє високі результати у випадках, коли аналізований сигнал є стаціонарним, тобто його частотний спектр не змінюється з часом. У такій ситуації можна вважати, що певні частоти (наприклад, *x* Гц) присутні протягом усього інтервалу спостереження сигналу, незалежно від конкретного моменту часу.

Однак зі зростанням нестаціонарності сигналу ефективність перетворення Фур’є суттєво знижується. Це є серйозною проблемою, оскільки переважна більшість реальних сигналів — мовні, біомедичні, мережеві, телекомунікаційні або відеосигнали — мають яскраво виражену часову мінливість своїх спектральних характеристик.

Класичне перетворення Фур’є забезпечує високу роздільну здатність у частотній області, проте фактично не містить інформації про те, коли саме в часі з’являються ті чи інші частотні компоненти. Іншими словами, воно має нульову часову роздільну здатність. Це обмеження унеможливлює аналіз короткочасних подій, стрибків, імпульсів або швидких змін спектра сигналу.

Для ілюстрації цього недоліку далі можуть бути розглянуті два показові приклади, які демонструють втрату часової інформації при застосуванні перетворення Фур’є та переваги вейвлет-перетворення у випадку аналізу нестаціонарних сигналів.

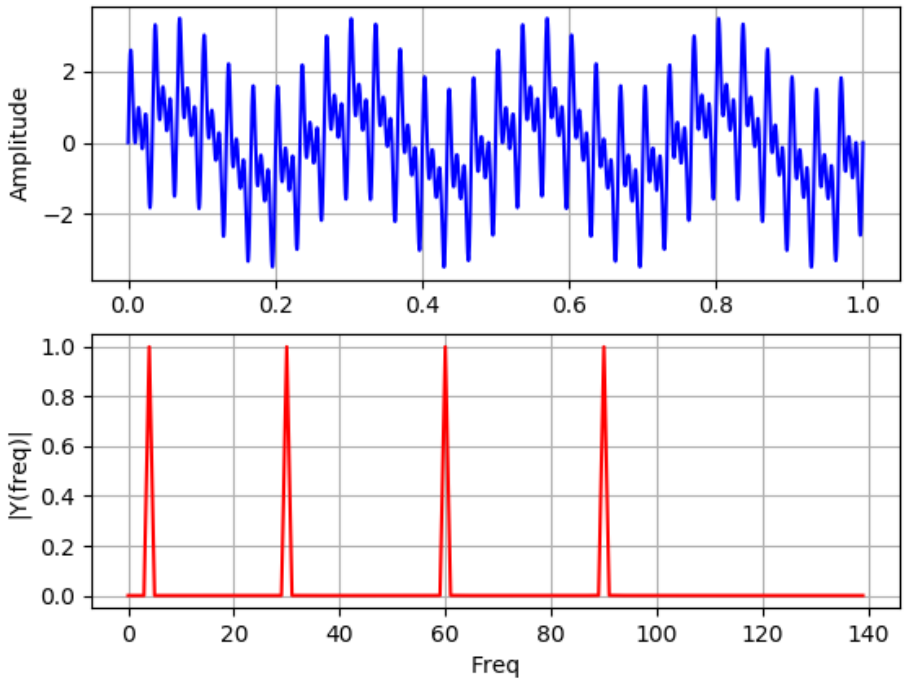


Рис. 1.1 На цьому графіку всі чотири частоти присутні в сигналі протягом усього часу його дії

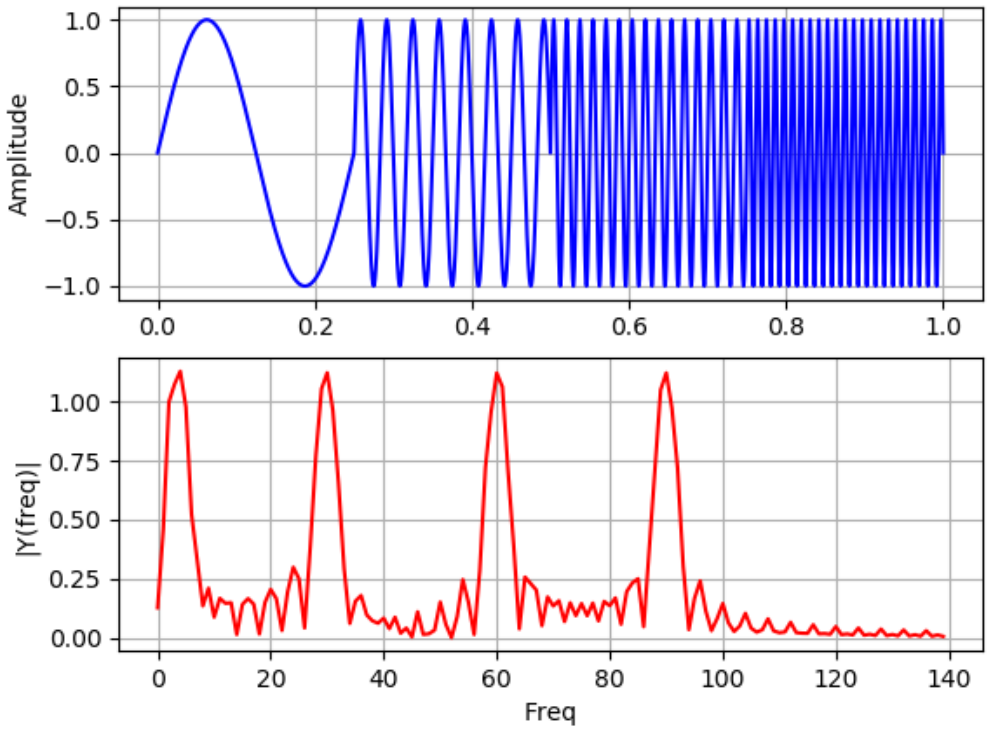


Рис. 1.2 На цьому графіку сигнали не перекриваються у часі, бічні пелюстки зумовлені розривом між чотирма різними частотами

Для двох частотних спектрів, які містять однакові чотири спектральні піки, перетворення Фур’є не здатне встановити, у яких саме часових ділянках сигналу присутні відповідні частотні компоненти. У такому випадку інформація про часову локалізацію частот повністю втрачається.

Найбільш доцільним і ефективним підходом до аналізу сигналів із динамічним, змінним у часі частотним спектром є застосування вейвлет-перетворення, яке забезпечує одночасний аналіз сигналу як у часовій, так і в частотній областях.

Основні властивості вейвлетів

Вибір типу вейвлета, а отже і його математичних та спектральних властивостей, безпосередньо визначається конкретною задачею аналізу сигналів. Різні класи вейвлетів мають відмінні характеристики локалізації в часі та частоті, гладкості, симетричності й кількості нульових моментів, що робить їх більш або менш придатними для певних практичних застосувань.

Так, наприклад, у задачах електроенергетики, зокрема під час визначення діючих значень струмів і напруг, підвищену точність забезпечують вейвлети Інгрід Добеші (Daubechies) вищих порядків. Це пояснюється тим, що такі вейвлети мають більшу кількість нульових моментів, кращі аппроксимаційні властивості та здатні ефективніше описувати складні, нестаціонарні компоненти сигналу, включаючи гармоніки та перехідні процеси.

Загалом, при виборі вейвлета доцільно враховувати:

- характер сигналу (стаціонарний або нестаціонарний);
- наявність різких змін, імпульсів або шумів;
- вимоги до точності реконструкції;
- обмеження на обчислювальні ресурси.

Основні властивості вейвлетів — такі як довжина фільтрів, кількість нульових моментів, підтримка, симетричність, ортогональність або біортогональність — можуть бути отримані та проаналізовані за допомогою інструментів бібліотеки PyWavelets. Зокрема, для цього використовується функція

pywt.DiscreteContinuousWavelet(), яка дозволяє отримати повну інформацію про параметри як дискретних, так і неперервних вейвлетів.

У наступному лістингу наведено приклад використання цієї функції для аналізу властивостей обраного вейвлета, що є корисним етапом при підготовці та налаштуванні алгоритмів вейвлет-аналізу.

```
import pywt
from pylab import *
from numpy import *
discrete_wavelets = ['db5', 'sym5', 'coif5', 'haar']
print('discrete_wavelets-%s'%discrete_wavelets )
st='db20'
wavelet = pywt.DiscreteContinuousWavelet(st)
print(wavelet)
i=1
phi, psi, x = wavelet.wavefun(level=i)
subplot(2, 1, 1)
title("Графіяк самої функції -%s"%st)
plot(x,psi,linewidth=2, label='level=%s'%i)
grid()
legend(loc='best')
subplot(2, 1, 2)
title("Графік перетвореної функції -%s"%st)
plt.plot(x,phi,linewidth=2, label='level=%s'%i)
legend(loc='best')
grid()
show()
```

Рис. 1.3 Аналіз властивостей обраного вейвлета

Отримаємо:

discrete_wavelets-['db5', 'sym5', 'coif5', 'haar']

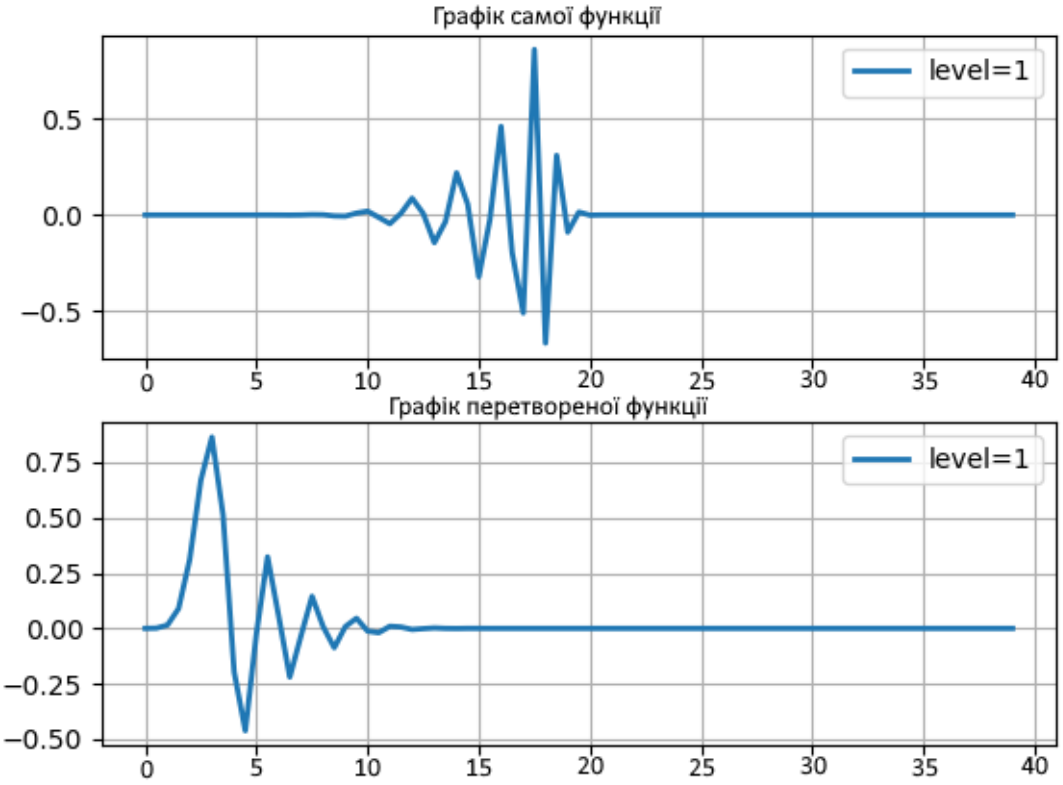


Рис. 1.4 Порівняння початкового сигналу та сигналу після вейвлет-перетворення (рівень декомпозиції level = 1), що ілюструє зміну структури сигналу та локалізацію його основних компонент

Режими розширення сигналу

Перед виконанням дискретного вейвлет-перетворення (DWT) із використанням банків фільтрів виникає необхідність штучно подовжити сигнал за його межами. Це зумовлено тим, що під час згортки сигналу з вейвлет-фільтрами на початку та в кінці часової послідовності бракує відліків, необхідних для коректних обчислень.

Спосіб такого подовження, або екстраполяції сигналу, має суттєвий вплив на результати вейвлет-аналізу. Невдалий вибір режиму розширення може призвести до появи граничних артефактів, які спотворюють вейвлет-коефіцієнти поблизу країв сигналу та знижують точність DWT-перетворення загалом. Особливо помітними ці викривлення стають при аналізі коротких сигналів або сигналів із різкими змінами на межах інтервалу спостереження.

Бібліотека PyWavelets надає декілька вбудованих режимів розширення сигналу, кожен з яких реалізує власний підхід до екстраполяції крайових значень. Правильний вибір такого режиму дозволяє мінімізувати негативний вплив граничних ефектів, покращити стабільність коефіцієнтів та підвищити якість подальшої реконструкції сигналу.

Для наочного порівняння та демонстрації роботи різних режимів розширення сигналу нижче наведено відповідний лістинг, у якому показано застосування доступних методів екстраполяції.

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
from pywt._doc_utils import boundary_mode_subplot
# synthetic test signal
x = 5 - np.linspace(-1.9, 1.1, 9)**2
# Create a figure with one subplots per boundary mode
fig, axes = plt.subplots(3, 3, figsize=(10, 6))
plt.subplots_adjust(hspace=0.5)
axes = axes.ravel()
boundary_mode_subplot(x, 'symmetric', axes[0], symw=False)
boundary_mode_subplot(x, 'reflect', axes[1], symw=True)
boundary_mode_subplot(x, 'periodic', axes[2], symw=False)
boundary_mode_subplot(x, 'antisymmetric', axes[3], symw=False)
boundary_mode_subplot(x, 'antireflect', axes[4], symw=True)
boundary_mode_subplot(x, 'periodization', axes[5], symw=False)
boundary_mode_subplot(x, 'smooth', axes[6], symw=False)
boundary_mode_subplot(x, 'constant', axes[7], symw=False)
boundary_mode_subplot(x, 'zeros', axes[8], symw=False)
plt.show()
```

Рис. 1.5 Методи екстраполяції сигналу

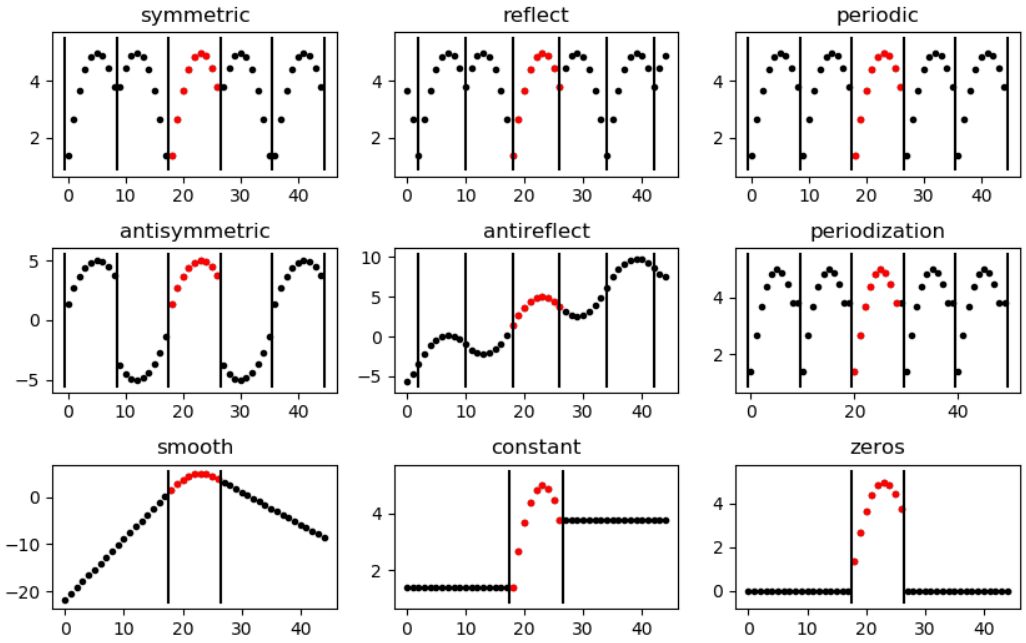


Рис. 1.6 На графіках показано, як короткий (червоний) сигнал розширюється (чорний) за межами своєї початкової протяжності

Дискретне вейвлет-перетворення

Для наочної демонстрації дискретного вейвлет-перетворення (DWT) доцільно використати сигнал із динамічним частотним спектром, у якому частотні складові поступово змінюються з часом. Зокрема, у такому сигналі спостерігається зростання частоти в напрямку від початку до кінця часової осі.

Початкова ділянка сигналу характеризується переважанням низькочастотних компонент, тоді як у кінцевій частині домінують високочастотні коливання короткохвильового діапазону. Така структура сигналу є особливо зручною для аналізу, оскільки дозволяє інтуїтивно та наочно оцінити роботу вейвлет-перетворення.

Завдяки часовій локалізації частотних компонент, притаманній DWT, можна без додаткових спектральних побудов визначити, які ділянки частотного спектра були відфільтровані або виділені, просто аналізуючи положення відповідних змін уздовж часової осі. Це наочно демонструє ключову перевагу вейвлет-перетворення над класичним перетворенням Фур’є — здатність одночасно враховувати як

частотні, так і часові характеристики сигналу, що є критично важливим при дослідженні нестаціонарних процесів.

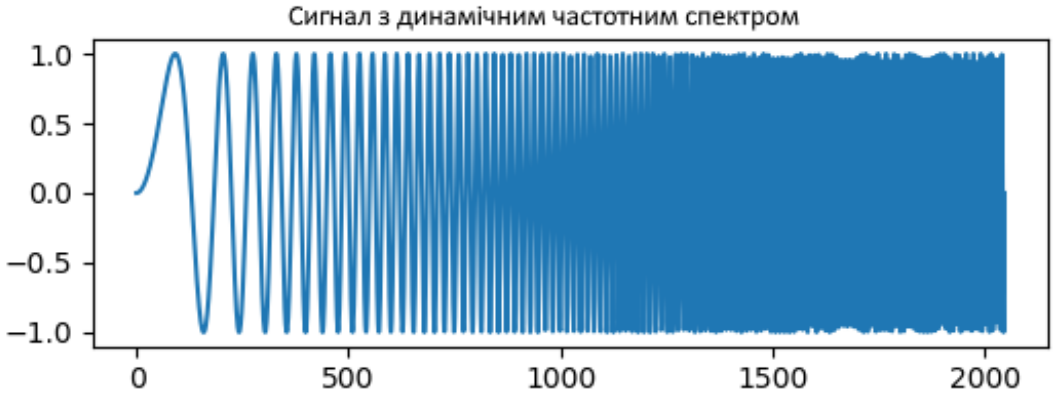


Рис. 1.7 Сигнал з динамічним частотним спектром

У бібліотеці PyWavelets версії 1.0.3 дискретне вейвлет-перетворення реалізується за допомогою функції pywt.dwt(). Дана функція призначена для виконання однорівневого дискретного вейвлет-аналізу сигналу, який задається у вигляді числового вектора відліків.

У результаті роботи функції pywt.dwt() обчислюються два основні набори коефіцієнтів:

- **апроксимуючі коефіцієнти cA**, що відображають низькочастотну складову сигналу та його загальну форму;
- **деталізуючі коефіцієнти cD**, які відповідають за високочастотні компоненти, зокрема різкі зміни, перехідні процеси та локальні особливості сигналу.

Ці коефіцієнти відповідають першому рівню вейвлет-декомпозиції і утворюються шляхом фільтрації сигналу парою низькочастотного та високочастотного фільтрів із подальшим проріджанням. Такий підхід дозволяє ефективно розділити сигнал на повільно змінну складову та деталі, що швидко змінюються у часі.

Функція **pywt.dwt()** є базовим інструментом вейвлет-аналізу в PyWavelets і широко використовується для попередньої обробки сигналів, аналізу нестаціонарних процесів, зменшення шумів, а також як перший етап багаторівневої вейвлет-декомпозиції.

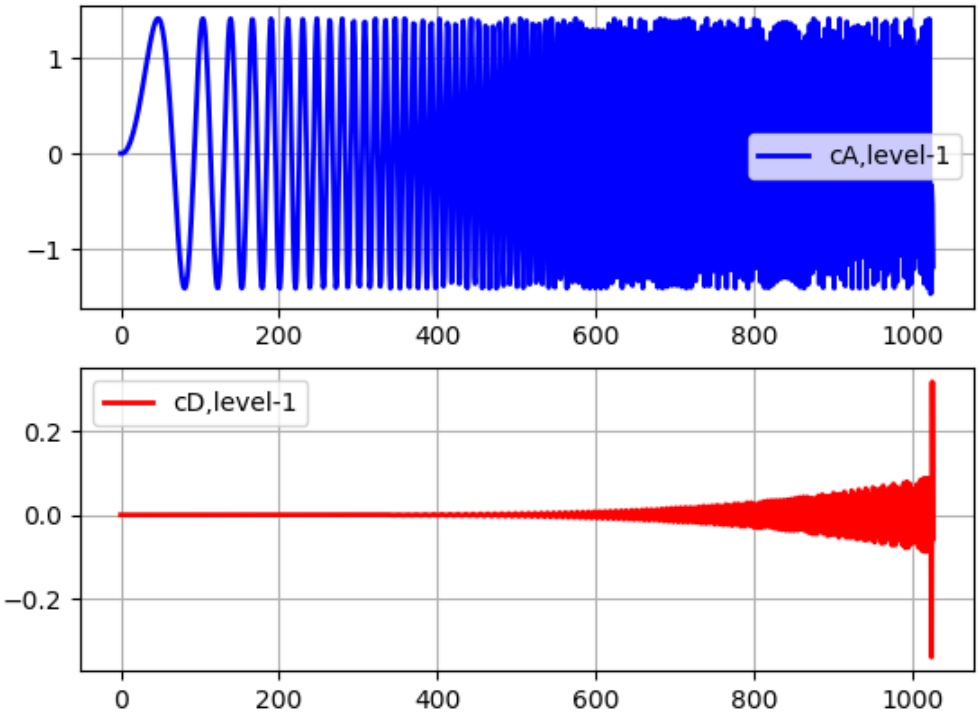


Рис. 1.8 Другий рівень перетворення

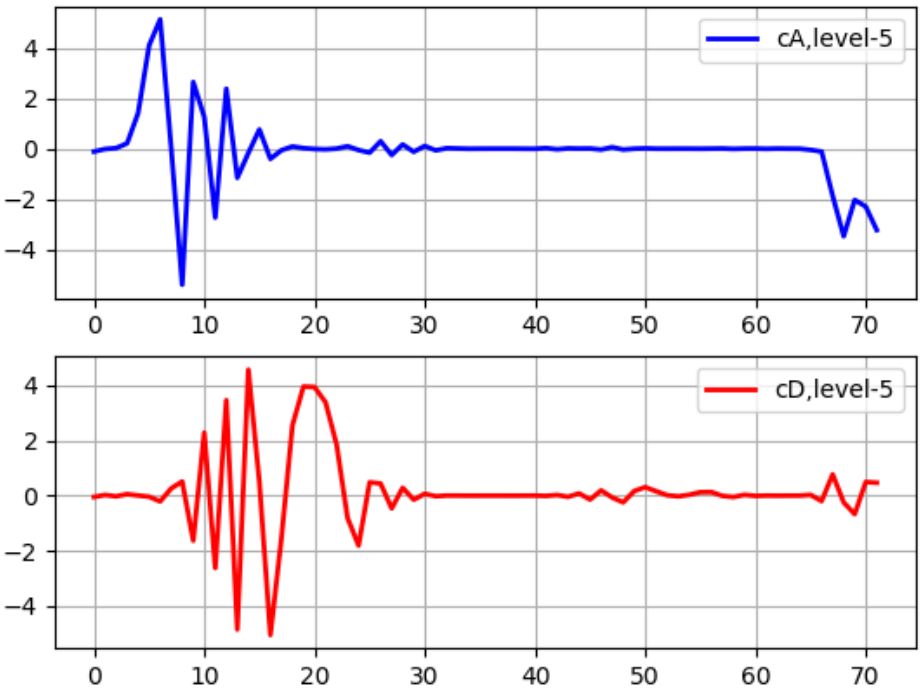


Рис. 1.9 П’ятий рівень перетворення

Коефіцієнти апроксимації (cA) є результатом роботи низькочастотного фільтра дискретного вейвлет-перетворення, який часто називають фільтром усереднення. Вони відображають загальну форму сигналу, його повільні зміни та основну енергетичну складову. Саме ці коефіцієнти містять інформацію про довготривалі тенденції сигналу та використовуються як базис для подальшої багаторівневої декомпозиції.

Натомість коефіцієнти деталізації (cD) формуються на виході високочастотного фільтра DWT, який виконує роль різницевого або виділяючого фільтра. Вони описують швидкозмінні компоненти сигналу, включаючи різкі перепади, імпульси, шумові складові та локальні особливості. Саме коефіцієнти cD є ключовими при аналізі перехідних процесів і короткочасних подій у нестаціонарних сигналах.

Для виконання багаторівневого вейвлет-аналізу в бібліотеці PyWavelets передбачена функція pywt.wavedec(), яка дозволяє одразу обчислити коефіцієнти вищих рівнів декомпозиції. Дана функція приймає на вхід початковий сигнал та заданий рівень розкладу, після чого повертає:

- один набір апроксимуючих коефіцієнтів n-го рівня, що характеризує найбільш згладжену версію сигналу;
- n наборів коефіцієнтів деталізації, починаючи з першого і до n-го рівня, кожен з яких відповідає окремому діапазону частот.

Такий підхід забезпечує ієрархічне представлення сигналу у різних частотних діапазонах і дозволяє гнучко аналізувати як глобальні, так і локальні особливості сигналу, що є однією з ключових переваг дискретного вейвлет-перетворення.

1.2 Банк фільтрів та декомпозиція

Питання, пов’язані з вибором рівнів вейвлет-перетворення, частково були розглянуті у попередньому підрозділі. Проте слід підкреслити, що дискретне вейвлет-перетворення (DWT) у практичній реалізації завжди подається у вигляді

банку фільтрів, який являє собою каскад низькочастотних та високочастотних фільтрів.

Банк фільтрів є одним із найбільш ефективних механізмів розділення сигналу на декілька частотних піддіапазонів. Такий підхід дозволяє послідовно виділяти окремі спектральні складові сигналу, зберігаючи при цьому часову локалізацію інформації, що є особливо важливим при аналізі нестаціонарних процесів.

На першому етапі декомпозиції, який відповідає малому масштабному фактору, виконується аналіз високочастотної поведінки сигналу. На цьому рівні виділяються швидкі зміни, різкі перепади та шумові компоненти, що локалізовані поблизу максимальної частоти сигналу.

На другому етапі масштаб збільшується в два рази, а відповідно аналізована частота зменшується вдвічі. У цьому випадку досліджується поведінка сигналу в області, близькій до половини максимальної частоти, що дозволяє виділити середньочастотні компоненти.

На третьому етапі масштабний коефіцієнт дорівнює чотирьом, і аналіз спрямований на частотний діапазон, що відповідає чверті максимальної частоти сигналу. Аналогічним чином процес продовжується і надалі: на кожному наступному рівні масштаб зростає вдвічі, а відповідний частотний діапазон звужується.

Цей каскадний процес триває доти, доки не буде досягнуто максимального рівня декомпозиції, який визначається довжиною сигналу, обраним типом вейвлета та параметрами фільтрів.

Максимально можливий рівень вейвлет-декомпозиції може бути обчислений за допомогою функції pywt.wavedec(). У результаті такого розкладу сигнал подається у вигляді одного набору апроксимуючих коефіцієнтів найвищого рівня та декількох наборів коефіцієнтів деталізації, кожен з яких відповідає певному частотному піддіапазону. Це забезпечує багатомасштабне представлення сигналу та створює основу для його подальшого аналізу, фільтрації або реконструкції.

```
import pywt
from pywt import wavedec
from pylab import *
from numpy import*
x = linspace (0,  1,  num = 2048)
data= sin (250  *  pi * x**2)
n_level=pywt.dwt_max_level(len(data), 'sym5')
print('Максимальний рівень декомпозиції: %s'%n_level)
x = linspace (0,  1,  num = 2048)
y = sin (250  *  pi * x**2)
st='sym5'
coeffs = wavedec(y, st, level=7)
subplot(2, 1, 1)
plot(coeffs[0],'b',linewidth=2, label='cA,level-7')
grid()
legend(loc='best')
subplot(2, 1, 2)
plot(coeffs[1],'r',linewidth=2, label='cD,level-7')
grid()
legend(loc='best')
show()
```

Рис. 1.10 Максимальний рівень декомпозиції можна визначити за допомогою функції pywt.wavedec()

Отримаємо:

Максимальний рівень декомпозиції: 7

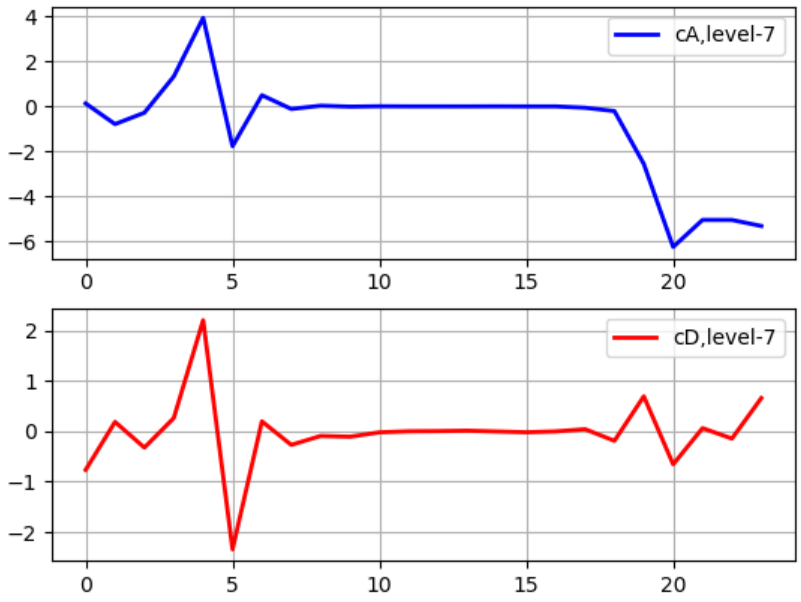


Рис. 1.11 Максимальний рівень декомпозиції

Процес вейвлет-декомпозиції припиняється в той момент, коли довжина сигналу стає меншою за довжину фільтра, що використовується для обраного типу вейвлета, зокрема sym5. За таких умов подальше коректне застосування фільтрації стає неможливим, оскільки кількості відліків сигналу вже недостатньо для виконання згортки з фільтрами аналізу.

Для кращого розуміння принципу багаторівневої декомпозиції розглянемо умовний приклад. Припустимо, що аналізується сигнал, спектр якого містить частотні компоненти до 1000 Гц.

На першому рівні декомпозиції сигнал за допомогою банку фільтрів розділяється на дві складові:

- низькочастотну в діапазоні 0–500 Гц, яка відповідає апроксимуючим коефіцієнтам;
- високочастотну в діапазоні 500–1000 Гц, що формує коефіцієнти деталізації першого рівня.

На другому рівні обробці підлягає лише низькочастотна складова попереднього етапу. Вона знову розбивається на два піддіапазони:

- 0–250 Гц — нова низькочастотна складова;
- 250–500 Гц — деталізуюча складова другого рівня.

На третьому рівні декомпозиції аналогічна операція виконується для діапазону 0–250 Гц, який поділяється на:

- 0–125 Гц — ще більш згладжену низькочастотну компоненту;
- 125–250 Гц — деталізуючі коефіцієнти відповідного рівня.

Такий ітеративний процес поділу частотного спектра продовжується й надалі: на кожному новому рівні аналізується лише низькочастотна частина сигналу, а межі відповідних частотних піддіапазонів зменшуються вдвічі. Декомпозиція триває до досягнення максимально можливого рівня, який визначається довжиною сигналу, параметрами фільтрів вейвлета sym5 та вимогами до точності аналізу.

1.3 Вейвлет скалограми

Шум

Шум на скалограмі, як правило, відображається у вигляді розсіяного набору дрібних елементів або хаотичних нерівномірних структур, які не мають чіткої часової чи масштабної локалізації. У деяких випадках такі нерівності можуть візуально нагадувати реальні інформаційні компоненти сигналу, що ускладнює їх однозначну інтерпретацію.

Тому під час аналізу реальних експериментальних даних необхідно проявляти підвищену обережність. Існує ризик помилково прийняти шумові артефакти за корисні особливості сигналу, особливо при високому рівні шуму або недостатній попередній фільтрації. У зв'язку з цим доцільно, за потреби, додатково оцінювати рівень шуму та застосовувати методи його зменшення або порогової обробки вейвлет-коефіцієнтів.

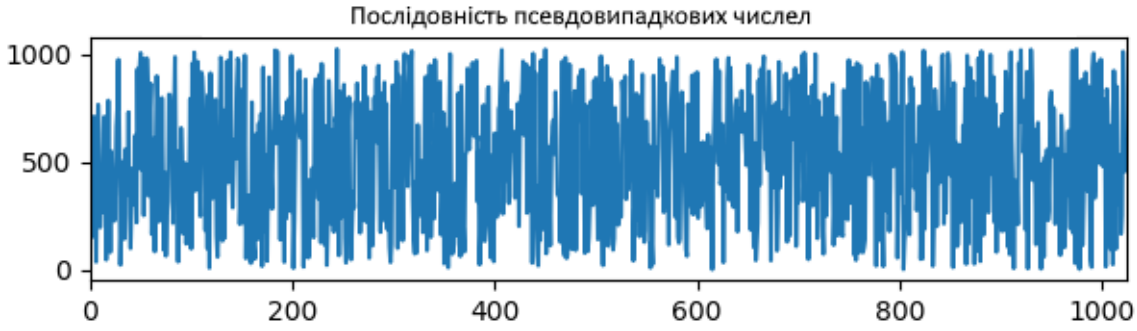


Рис. 1.12 Послідовність псевдовипадкових чисел

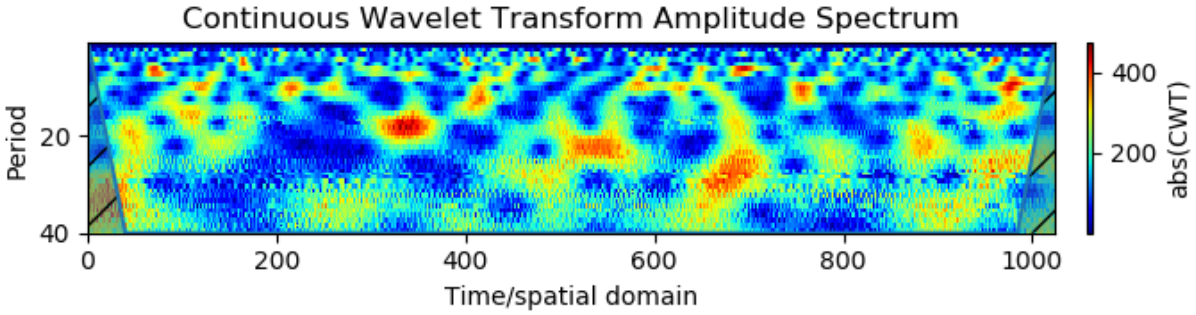


Рис. 1.13 Скаллограма амплітуд безперервного вейвлет-перетворення (CWT), що відображає розподіл енергії сигналу в часі та за масштабами (періодами) і дозволяє виявити нестаціонарні частотні компоненти

Слід також враховувати, що через випадкову природу шуму верхній графік (скаллограма) може відрізнятися при кожному запуску програми. Це зумовлено генерацією нових реалізацій шумової складової або незначними змінами початкових умов обробки. Така варіативність є нормальною та повинна враховуватися під час порівняння результатів аналізу й формування висновків.

Вейвлет-скаллограми спеціальних сигналів

У бібліотеці PyWavelets міститься набір із двадцяти спеціальних тестових сигналів, призначених для демонстрації та дослідження можливостей вейвлет-перетворення. Ці сигнали є стандартизованими прикладами, які широко використовуються як у навчальних цілях, так і під час розроблення та налагодження алгоритмів вейвлет-аналізу.

Вейвлет-скаллограми таких спеціальних сигналів дозволяють наочно проілюструвати, як різні типи сигналів — імпульсні, гармонічні, кусково-неперервні або шумові — відображаються у часово-масштабному просторі. Завдяки цьому дослідник може краще зрозуміти вплив вибору вейвлета, масштабу та рівня аналізу на результати перетворення, а також оцінити чутливість методу до локальних особливостей сигналу.

Наявність готового набору тестових сигналів у PyWavelets є особливо корисною під час порівняльного аналізу, перевірки коректності реалізації алгоритмів та підготовки ілюстративних прикладів для наукових публікацій або навчальних матеріалів.

У зв’язку з цим доцільно навести відповідний лістинг програми, який дозволяє виконати вейвлет-аналіз усіх двадцяти спеціальних сигналів, побудувати їх скаллограми та проаналізувати характерні особливості кожного з них. Такий підхід забезпечує комплексне уявлення про можливості вейвлет-перетворення та його практичне застосування для сигналів різної природи.

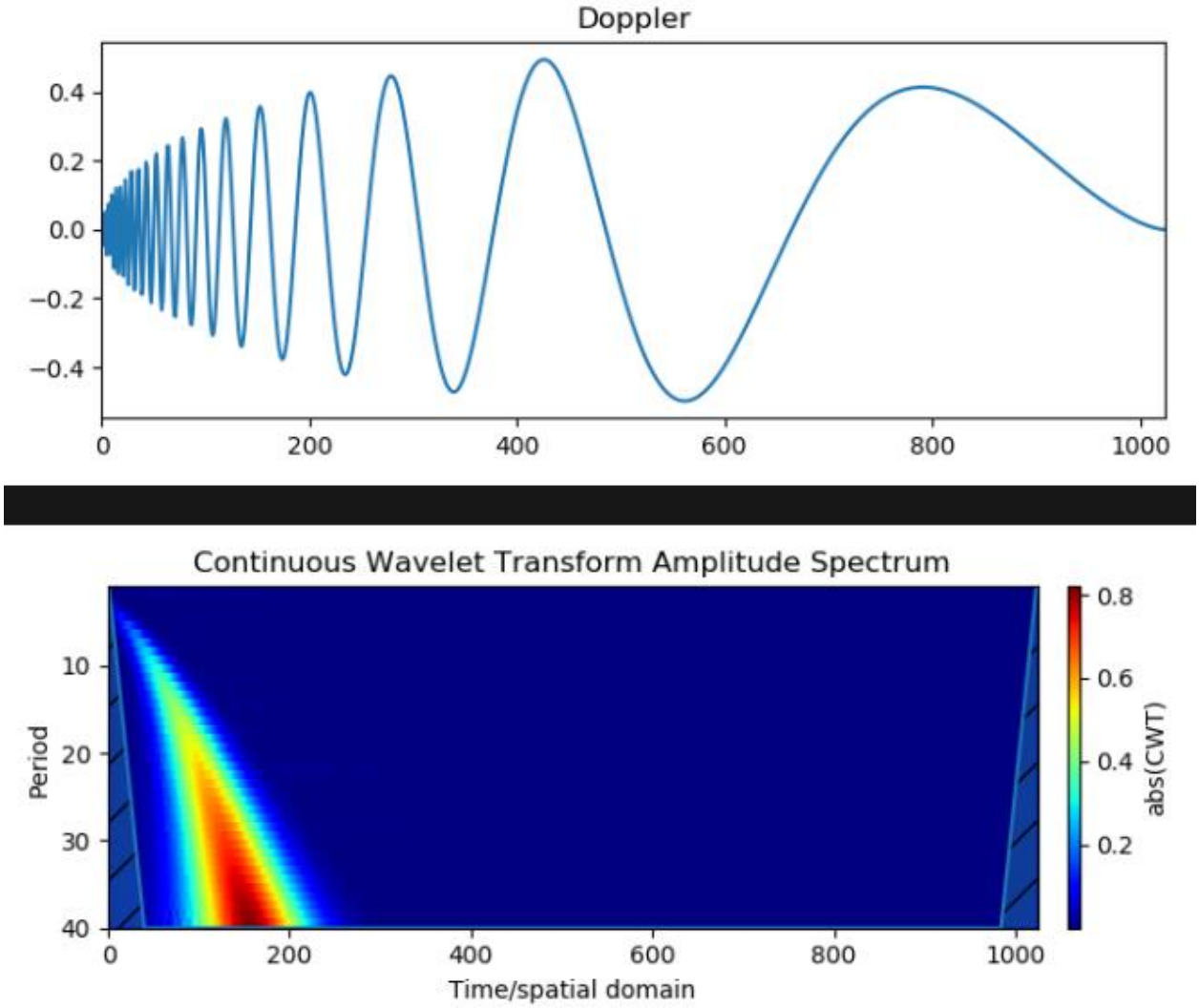


Рис. 1.14 Тестовий сигнал «Doppler» та його вейвлет-скаллограма, що ілюструє зміну частотної структури сигналу в часі та ефективність безперервного вейвлет-перетворення для аналізу нестаціонарних коливань

Синтез результатів (інтерпретація скаллограми)

Скаллограма зазвичай будується на основі нормалізованих даних, що забезпечує кращу наочність і порівнюваність амплітуд для всіх масштабів аналізу. Завдяки цьому безперервне вейвлет-перетворення (CWT) дозволяє за відносно короткий проміжок часу отримати значний обсяг інформації про структуру та динаміку сигналу, яку складно виявити за допомогою традиційних частотних методів.

Проведений аналіз дає змогу виділити низку характерних закономірностей:

- Щотижнева варіація, що відображає типові робочі та організаційні звички в лікарнях, чітко простежується протягом кількох десятиліть. Це свідчить про стабільність певних циклічних процесів у досліджуваних даних.
- У 1980-х роках спостерігається зростання амплітуди щотижневого компонента, що може бути пов’язано зі змінами в режимах роботи медичних установ, трансформаціями соціальних звичок, коливаннями рівня народжуваності або ж загальними демографічними змінами населення.
- Друга смуга в напіврічному діапазоні чітко ідентифікується як друга гармоніка основного річного циклу. Окрім цього, у часово-масштабній області від трьох до одного місяця з’являються менш чіткі, розмиті структури, які можуть відповідати третій гармоніці. Їхнє виділення ускладнюється тим, що річні коливання мають дуже велику енергію та домінують у спектрі.
- Такі короткоперіодичні ефекти також можуть бути зумовлені впливом святкових періодів на народжуваність, що потребує більш детального статистичного та соціального аналізу для підтвердження причинно-наслідкових зв’язків.
- Окремо слід відзначити ефект кінця року, чітко зафіксований у періоди Різдва та 1 січня. Завдяки вейвлет-аналізу цей ефект стає добре помітним, тоді як при використанні інших частотних методів він міг би залишитися непоміченим або згладженим.

Таким чином, застосування CWT і аналіз скаллограми дозволяють не лише виявляти домінуючі періодичні компоненти, але й глибше зрозуміти складну багаторівневу структуру часових даних та вплив зовнішніх факторів на досліджувані процеси.

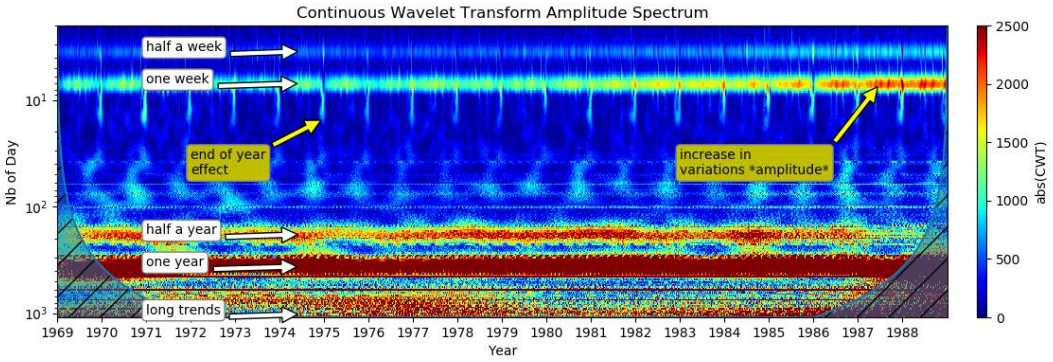


Рис. 1.15 Скаллограма амплітуд безперервного вейвлет-перетворення, що відображає багаторічну динаміку часових даних із виділенням домінуючих періодичностей (півтижневої, тижневої, піврічної та річної), ефекту кінця року та зростання амплітуди варіацій у 1980-х роках

2 ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ

2.1 Ключові характеристики

Ми звикли до того, що передача даних по повітрю стала буденною та повсюдною. Безпроводові технології використовуються практично скрізь — Wi-Fi, Bluetooth, 3G, 4G та інші стандарти забезпечують швидкий обмін великими обсягами інформації. У більшості випадків основними критеріями оцінювання таких технологій вважають швидкість передавання даних і пропускну здатність каналу. Однак виникає логічне питання: чи завжди саме ці параметри є визначальними?

У промислових системах безпроводові технології також активно розвиваються та впроваджуються. Проте, окрім звичних Wi-Fi або Bluetooth, на промислових об’єктах нерідко використовуються, на перший погляд, менш популярні або навіть «екзотичні» протоколи, такі як WirelessHART або Trusted Wireless 2.0. Максимальна швидкість передавання даних у цих системах становить близько 250 кбіт/с, що виглядає незначною на тлі сучасних високошвидкісних стандартів. На перший погляд може здатися, що це застарілі рішення, які варто замінити на Wi-Fi чи інші «швидкі» протоколи. Проте для промислових умов такий підхід не завжди є виправданим.

У промисловості першочергове значення мають надійність, завадостійкість, передбачуваність затримок та стабільність зв’язку, а не максимальна швидкість. Саме тому низькошвидкісні, але добре оптимізовані протоколи часто виявляються більш придатними для роботи в умовах сильних електромагнітних завад, складної радіообстановки та високих вимог до безпеки.

Для детальнішого аналізу доцільно порівняти чотири безпроводові технології: Wi-Fi, Bluetooth, Trusted Wireless 2.0 та WirelessHART. Усі вони розглядаються в діапазоні 2,4 ГГц, який є найбільш поширеним і практично актуальним. Інші частотні діапазони, зокрема 5 ГГц, менш універсальні та підтримуються переважно лише Wi-Fi.

Порівняння виконуватиметься за такими основними критеріями:

- надійність передавання даних;
- сумісність із іншими безпроводовими мережами;
- безпека передавання інформації;
- дальність і стабільність зв’язку;
- структура мережі;
- характер взаємодії вузлів мережі.

Слід зазначити, що таке порівняння має теоретичний характер, однак воно дозволяє сформувати цілісне уявлення про переваги та обмеження кожної технології.

Усі перелічені безпроводові технології функціонують у зашумленому та перевантаженому радіочастотному середовищі, де одночасно працює велика кількість передавачів. У таких умовах ключовою проблемою стає виявлення завад, перехресних інтерференцій і короткочасних імпульсних спотворень, які безпосередньо впливають на надійність зв’язку.

Саме тут важливу роль відіграє вейвлет-аналіз, який дозволяє:

- виявляти нестаціонарні завади та короткочасні перешкоди, характерні для промислових середовищ;
- локалізувати завади одночасно в часовій і частотній областях, що неможливо при використанні лише класичного перетворення Фур’є;
- виконувати фільтрацію шуму шляхом порогової обробки вейвлет-коефіцієнтів без суттєвого спотворення корисного сигналу;
- аналізувати вплив різних протоколів доступу до середовища на спектральну структуру сигналу.

Таким чином, вейвлет-аналіз є ефективним інструментом для оцінювання завадостійкості безпроводових технологій, особливо в промислових мережах, де стабільність і надійність передавання даних значно важливіші за максимальну швидкість. Це робить його доцільним методом як для моніторингу радіообстановки, так і для оптимізації та фільтрації сигналів у сучасних безпроводових системах зв’язку.

2.2 Класифікація характеристик

Надійність передавання даних

Першим питанням, яке закономірно виникає під час проєктування мереж із використанням безпроводових технологій, є надійність передавання даних. Під надійністю у цьому контексті доцільно розуміти стале підтримання з'єднання та передавання інформації без втрат, з мінімальною кількістю помилок і повторних передавань.

Порушення цілісності даних або розриви з'єднання, як правило, зумовлюються двома основними чинниками:

- електромагнітними завадами;
- затуханням сигналу, пов'язаним із поширенням радіохвиль у вільному просторі, а також із відбиттями, дифракцією та багатопроменевим розповсюдженням.

Електромагнітні завади

В умовах телекомунікаційного об'єкта електромагнітні завади формуються насамперед частотними перетворювачами, електроприводами, зварювальним обладнанням та іншими елементами телекомунікаційного устаткування. Подібні джерела створюють завади переважно в діапазонах, кратних кГц або МГц.

Водночас усі технології, що розглядаються для порівняння, функціонують у діапазоні 2,4 ГГц. Тому завади, які генеруються первинним промисловим обладнанням, зазвичай не досягають цього частотного діапазону і не чинять прямого впливу на радіоканал. У результаті основним джерелом завад стають інші безпроводові системи, що одночасно працюють у тому самому діапазоні 2,4 ГГц.

Для забезпечення електромагнітної сумісності таких систем у практиці використовуються два принципово різні підходи:

- застосування широкосмугової модуляції з прямим розширенням спектра (*Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS*);
- використання псевдовипадкової перебудови робочої частоти (*Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS*).

Метод DSSS

При використанні DSSS корисний сигнал пропускається через генератор коду розширення спектра, у якому кожен біт інформації замінюється на N бітів коду. Унаслідок цього тактова частота зростає у N разів, а спектр сигналу відповідно розширюється в N разів. На приймальній стороні сигнал проходить через ідентичний генератор, де виконується декодування та відновлення початкових даних.

Основною перевагою такого підходу є можливість передавання даних з високою швидкістю та підвищена стійкість до вузькосмугових завад. Оскільки сигнал займає широку смугу частот, завади впливають лише на окремі її ділянки, і наявної надмірності зазвичай достатньо для коректного відновлення інформації.

Водночас DSSS має і певні обмеження. Якщо потужність або ширина спектра завади перевищує критичний поріг, процес декодування стає неможливим. У такій ситуації приймальний генератор вже не здатний відокремити корисний сигнал від накладених перешкод, що призводить до втрати даних або повного зриву з'єднання.

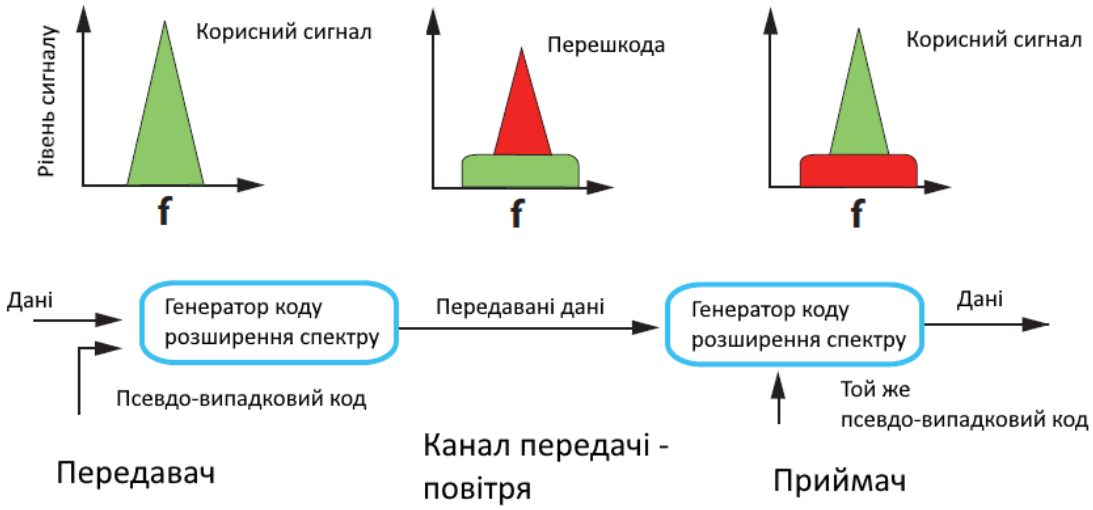


Рис. 2.1 Принцип дії методу прямого розширення спектра (DSSS): формування та передавання корисного сигналу з використанням псевдовипадкового коду, його взаємодія з вузькосмуговою перешкодою в радіоканалі та відновлення корисних даних на приймальній стороні

DSSS та FHSS: особливості роботи та завадостійкість

При використанні технології FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) робоча частота передавання даних постійно змінюється у псевдовипадковому порядку відповідно до заздалегідь узгодженої послідовності. У такому випадку завада, що виникає в радіоканалі, впливає лише на окрему випадкову частоту, незалежно від ширини спектра цієї завади. Внаслідок цього система FHSS зазвичай втрачає лише частину переданих даних, тоді як загальне з'єднання зберігається.

На відміну від цього, у системах із DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) корисний сигнал займає широку смугу частот одночасно. Якщо в цьому діапазоні виникають потужні або широкосмугові електромагнітні завади, вони можуть накрити значну частину спектра сигналу. У такій ситуації приймач уже не здатний коректно відокремити корисний сигнал від перешкод, і передавання даних може повністю зупинитися. Таким чином, за умов сильних електромагнітних завад FHSS демонструє вищу живучість, тоді як DSSS є більш чутливим до перевантаження спектра.

Застосування DSSS у Wi-Fi

Технологія Wi-Fi використовує метод DSSS (а в сучасних стандартах — його розвиток у вигляді OFDM). Ширина одного каналу Wi-Fi становить 22 МГц, що зумовлює щільне використання частотного ресурсу в діапазоні 2,4 ГГц. Теоретично в цьому діапазоні доступні 14 каналів, однак у Україні та більшості європейських країн використовується 13 каналів. При цьому лише три канали є неперекривними, що істотно обмежує можливості сумісного використання мереж.

Саме через це в умовах щільної забудови часто спостерігається ситуація, коли якість Wi-Fi-з'єднання різко погіршується або мережа взагалі перестає працювати. Найпоширенішою причиною є робота сусідніх точок доступу на тому самому або перекривних каналах, що призводить до взаємних завад і перевантаження спектра.

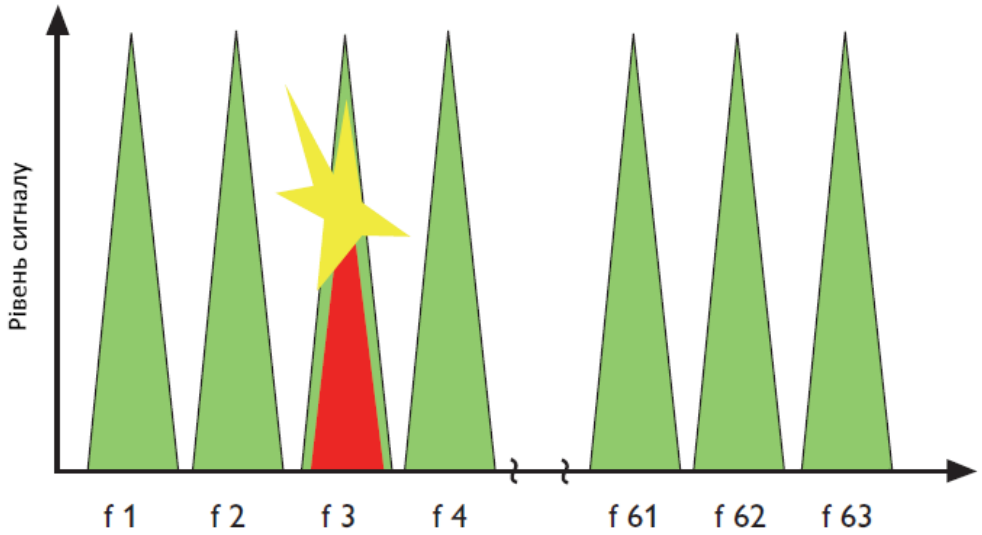


Рис. 2.2 Ілюстрація принципу FHSS: псевдовипадкове перестроювання робочої частоти між окремими вузькими каналами та локальний вплив завади, що перекриває лише один частотний піддіапазон без порушення передавання на інших частотах

Застосування FHSS у Bluetooth

На відміну від Wi-Fi, технологія Bluetooth використовує FHSS, що забезпечує вищу стійкість до завад у перевантаженому радіочастотному середовищі. Ширина одного каналу Bluetooth становить лише 1 МГц, а для перестроювання частоти доступно 79 каналів. Передавання даних здійснюється шляхом швидкого перемикання між цими каналами за псевдовипадковим законом.

Як і у випадку з Wi-Fi, кількість доступних каналів може відрізнятися залежно від країни, однак загальний принцип залишається незмінним: FHSS дозволяє мінімізувати вплив вузькосмугових і навіть широкосмугових завад, оскільки ймовірність тривалого накладання перешкоди на всі робочі частоти є вкрай малою.

Особливості WirelessHART і Trusted Wireless 2.0 та їх завадостійкість

Технологія WirelessHART використовує комбінований підхід, поєднуючи переваги FHSS (псевдовипадкову перебудову частоти) та DSSS (пряме розширення спектра). Така гібридна схема дозволяє одночасно підвищити стійкість до завад і забезпечити надійне передавання даних у складних промислових умовах. Ширина

одного каналу WirelessHART становить 2 МГц, при цьому канали розміщуються з кроком 5 МГц. У результаті доступними є 16 частотних каналів, і всі вони є неперекривними, що істотно зменшує взаємний вплив сусідніх каналів і підвищує електромагнітну сумісність із іншими системами.

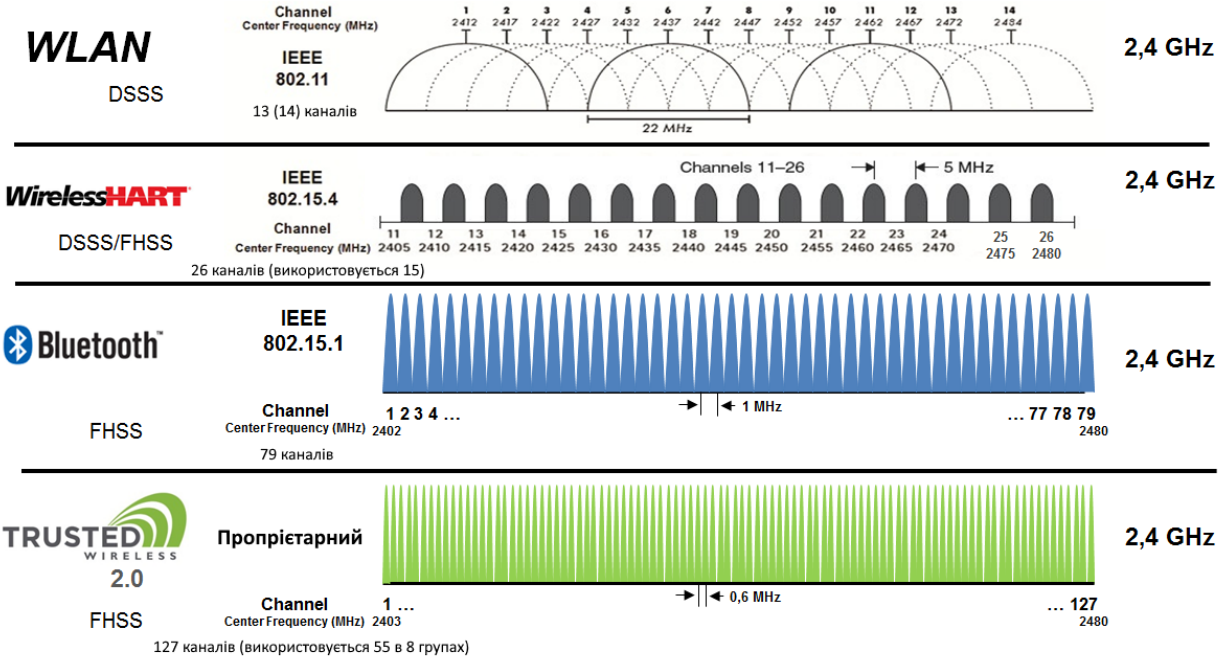


Рис. 2.3 Згасання сигналу через поширення радіохвиль у вільному просторі та виникнення відображень

Система Trusted Wireless 2.0, у свою чергу, базується виключно на технології FHSS. Для перестроювання робочої частоти пристроям доступно 127 каналів, що забезпечує високий рівень завадостійкості та гнучкість роботи в перевантаженому радіочастотному середовищі. Реальна кількість частот, які може використовувати конкретний пристрій, визначається «чорним списком частот», що формується з метою уникнення конфліктів з іншими безпроводовими системами. Додатково можуть застосовуватися спеціальні частотні групи (RF band), які дозволяють оптимізувати роботу мережі, підвищити її стабільність і зменшити рівень взаємних завад.

Вплив середовища передавання на сигнал

У процесі поширення в середовищі передавання радіосигнал зазнає ослаблення, яке зумовлюється низкою зовнішніх факторів. Одним із найважливіших є відбиття радіохвиль від об’єктів навколишнього середовища —

металевих конструкцій, обладнання, стін та інших перешкод, характерних для промислових об’єктів.

Сигнал від передавача до приймача поширюється декількома шляхами одночасно, унаслідок чого до приймальної антени доходять кілька копій одного й того самого сигналу. Через різну довжину шляхів ці хвилі можуть приходити з різними фазами. Це явище призводить до багатопроменевого розповсюдження, яке може:

- послаблювати сигнал, якщо хвилі знаходяться у протифазі;
- підсилювати сигнал, якщо їхні фази збігаються.

Переваги FHSS у складних умовах поширення

На тлі описаних фізичних ефектів технологія FHSS отримує додаткову перевагу. Оскільки робоча частота постійно змінюється, система автоматично знижує вплив багатопроменевих завмирань. Якщо на певній частоті через фазове гасіння або локальні перешкоди передавання даних стає неможливим, то на наступній частоті сигнал, як правило, має достатній рівень для коректного приймання.

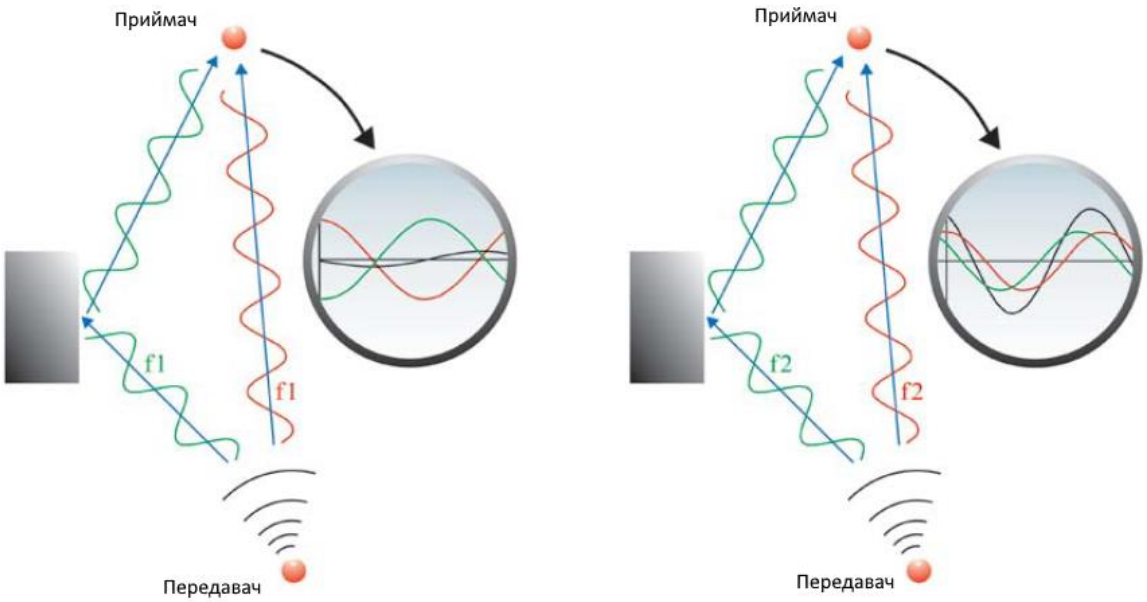


Рис. 2.4 Згасання сигналу через поширення радіохвиль у вільному просторі та виникнення відображень

Таким чином, застосування FHSS у таких системах, як WirelessHART і Trusted Wireless 2.0, дозволяє значно підвищити надійність зв'язку, особливо в промислових умовах із великою кількістю відбивних поверхонь, завад і складною радіообстановкою.

Сумісність з іншими безпроводовими мережами

Як зазначалося раніше, основним джерелом завад у діапазоні 2,4 ГГц є інші системи, що працюють у цьому ж частотному діапазоні. З огляду на те, що безпроводові мережі в промисловості дедалі активніше впроваджуються, кількість таких систем на об'єктах постійно зростає. У результаті питання забезпечення електромагнітної сумісності та коректного співіснування різних безпроводових технологій стає критично важливим для організації надійного, стабільного та безперервного передавання даних.

Найбільш складною з точки зору сумісності є технологія Wi-Fi. Це пов'язано з тим, що Wi-Fi використовує DSSS (або його похідні) та має відносно широку смугу одного каналу. Через це одночасне функціонування Wi-Fi з іншими безпроводовими технологіями в тому самому частотному діапазоні часто супроводжується значними взаємними завадами. Теоретично в діапазоні 2,4 ГГц можна організувати лише три неперекривні канали Wi-Fi, однак така ситуація можлива лише в ідеальних умовах.

На практиці ж у житлових будинках, офісах, торгових центрах і промислових зонах одночасно працює значно більше Wi-Fi-мереж. Це призводить до використання перекривних каналів, унаслідок чого різко знижується якість зв'язку, зростає кількість повторних передавань кадрів, а в окремих випадках підключення до мережі стає взагалі неможливим.

Найкращі показники сумісності демонструє протокол Trusted Wireless 2.0. Окрім використання технології FHSS, у ньому реалізовано спеціальний механізм «чорного списку частот». Суть цього механізму полягає в тому, що частотні діапазони, зайняті іншими безпроводовими мережами, вносяться до забороненого списку. Пристрої Trusted Wireless 2.0 не використовують частоти з цього списку та

не виконують перестроювання на них, що істотно знижує рівень взаємних завад і підвищує стабільність роботи мережі.

Технологія WirelessHART також демонструє достатньо високий рівень сумісності з іншими системами. У ній, як і в Trusted Wireless, застосовується FHSS, а також передбачена можливість формування «чорних списків каналів». Проте відносно невелика кількість доступних частот для перестроювання обмежує гнучкість WirelessHART у порівнянні з Bluetooth або Trusted Wireless 2.0.

У Bluetooth та Trusted Wireless 2.0 ця проблема вирішується ефективніше: у разі виникнення завади на певній частоті система має можливість переключитися на велику кількість альтернативних каналів, що забезпечує високу живучість мережі навіть у складній та перевантаженій радіочастотній обстановці.

Таким чином, сумісність з іншими безпроводовими мережами значною мірою визначається:

- шириною каналу;
- кількістю доступних частот;
- наявністю механізмів адаптації, таких як FHSS та «чорні списки»;
- здатністю протоколу динамічно реагувати на зміну радіообстановки.

Ці фактори є ключовими при виборі технології для промислових безпроводових систем зв’язку, де стабільність і надійність мають першочергове значення.

Безпека передавання даних

Інформаційна безпека сьогодні є одним із ключових напрямів розвитку промислової автоматизації, і цей аспект неможливо ігнорувати, особливо під час розгляду безпроводових мереж. На відміну від провідних рішень, у безпроводових системах дані передаються через відкритий та фізично незахищений інтерфейс — радіоефір, що істотно підвищує ризик несанкціонованого доступу, перехоплення та модифікації інформації. Тому надзвичайно важливо завчасно враховувати питання захисту, впроваджувати механізми автентифікації користувачів і забезпечувати передавання даних у зашифрованому вигляді.

Передавання даних у мережах Wi-Fi може бути захищене за допомогою різних методів автентифікації та шифрування, зокрема WEP, TKIP, WPA та WPA2. Проте, незважаючи на наявність цих механізмів, Wi-Fi залишається вразливим до широкого спектра загроз інформаційній безпеці. Через високу популярність протоколу більшість відомих уразливостей детально описані у відкритих джерелах, а методики атак легко знаходяться в мережі Інтернет, включно з численними навчальними матеріалами та відеооглядами. Навколо теми зламу Wi-Fi сформувалася велика спільнота, що додатково підвищує ризики при його використанні в критично важливих системах.

З’єднання Bluetooth захищається за допомогою PIN-коду та механізмів шифрування трафіку. Однак Bluetooth має схожі проблеми з Wi-Fi: це відкритий і масово поширений протокол, для якого також існує значна кількість публічно доступної інформації щодо можливих способів компрометації. У результаті рівень захищеності Bluetooth у промислових застосуваннях часто вважається недостатнім без додаткових заходів безпеки.

На цьому тлі Trusted Wireless 2.0 вигідно вирізняється завдяки використанню закритої (пропрієтарної) технології, що суттєво ускладнює реалізацію атак у порівнянні з відкритими стандартами. Безпроводовий канал у Trusted Wireless 2.0 має підвищений рівень захисту від несанкціонованого доступу та активних втручань.

Окрім цього, Trusted Wireless 2.0 реалізує два ключові механізми забезпечення безпеки:

- шифрування всіх передаваних даних за допомогою алгоритму AES-128, що є загальновизнаним стандартом криптографічного захисту;
- пропрієтарний протокол автентифікації, який дозволяє переконатися, що повідомлення отримане саме авторизованим приймачем. Для цього кожне повідомлення містить унікальний код, який не може бути повторно використаний, що ефективно захищає систему від атак типу повторного відтворення (replay attack).

Технологія WirelessHART також забезпечує високий рівень захисту інформації, використовуючи алгоритм шифрування AES з 128-бітним ключем, що відповідає сучасним вимогам до безпеки в промислових мережах.

Додаткову перевагу в аспекті безпеки отримують технології, які застосовують FHSS. Оскільки перестроювання робочої частоти відбувається за псевдовипадковим алгоритмом, причому ця послідовність є індивідуальною для кожного з'єднання, перехоплення або цілеспрямоване глушіння сигналу стає значно складнішим. Таким чином, FHSS підвищує не лише завадостійкість, а й загальний рівень захисту передавання даних.

Отже, вибір безпроводової технології для промислових застосувань має ґрунтуватися не лише на швидкості та дальності зв'язку, але й на комплексній оцінці механізмів інформаційної безпеки, здатності протоколу протистояти сучасним загрозам та відповідати вимогам критично важливих систем.

Дальність передавання даних

Для безпроводового передавання даних, особливо у зовнішніх застосуваннях, дальність зв'язку відіграє визначальну роль. Вона безпосередньо впливає на можливість побудови мережі, кількість вузлів, необхідність ретрансляторів та загальну надійність системи. Водночас навіть у сценаріях, де передавання на великі відстані не є обов'язковим, висока чутливість приймача створює додатковий запас по енергетиці каналу. Це дозволяє забезпечити стабільний зв'язок у складних умовах, наприклад за відсутності прямої видимості, при наявності перешкод або у зашумленому радіосередовищі.

Одним із ключових чинників, що впливають на дальність передавання, є швидкість передавання даних. За зменшення швидкості час передавання одного біта збільшується, що призводить до зростання енергії, яка припадає на один біт інформації. У результаті підвищується ймовірність коректного приймання сигналу на більшій відстані.

Енергія одного біта визначається співвідношенням:

$$E^{(bit)} = P \cdot t^{(bit)} \tag{2.1}$$

де P — потужність передавання, а $t_{(bit)}$ — тривалість передавання одного біта. Таким чином, за сталої потужності передавача зменшення швидкості (і відповідно збільшення $t_{(bit)}$) приводить до зростання $E_{(bit)}$, що позитивно позначається на дальності та завадостійкості каналу.

Розглянемо це на прикладах конкретних технологій. Wi-Fi за швидкості передавання 54 Мбіт/с може забезпечувати зв’язок на відстанях до 1 км за умови використання потужної вузькоспрямованої антени. Якщо ж знизити швидкість до 6 Мбіт/с, дальність передавання може зрости і до 1–2 км, що пояснюється збільшенням енергії на біт і підвищенням чутливості приймання.

Технологія Bluetooth має значно нижчу швидкість передавання порівняно з Wi-Fi (приблизно 1 Мбіт/с), однак за рахунок цього та відповідних режимів модуляції здатна забезпечувати дальність зв’язку до 1,5 км за сприятливих умов.

Система WirelessHART працює зі швидкістю передавання 250 кбіт/с. Для неї середньою дальністю зв’язку прийнято вважати близько 255 м. Теоретично, при використанні спрямованих антен, можна досягати відстаней до 2 км. Проте на практиці в польових датчиках і WirelessHART-адаптерах зазвичай застосовуються малопотужні ненаправлені антени, що й обмежує реальну дальність типовим значенням у 255 м.

Отже, дальність передавання даних у безпроводових системах визначається сукупністю чинників: швидкістю передавання, потужністю передавача, чутливістю приймача, типом антен та умовами поширення радіохвиль. Зниження швидкості передавання часто є свідомим інженерним компромісом, який дозволяє суттєво підвищити надійність і дальність зв’язку, що є особливо важливим для промислових і критично важливих застосувань.

2.3 Структура мережі та характер взаємодії вузлів

У використовуваних топологіях мереж між різними безпроводовими технологіями існують суттєві відмінності, які безпосередньо впливають на масштабованість, надійність та гнучкість системи зв’язку.

Для Bluetooth передбачено використання відносно простих топологій. Найпоширенішими є топологія «точка–точка» та топологія «зірка». У зіркоподібній конфігурації один головний пристрій (master) може обслуговувати до 7 підлеглих пристроїв (slave). Такий підхід є достатнім для персональних або малих мереж, проте він обмежує масштабування та не забезпечує високої живучості у разі відмови центрального вузла.

Технологія Wi-Fi пропонує значно ширший вибір топологій. Класичним варіантом є топологія «зірка», яка широко використовується в побуті та офісах, коли декілька клієнтських пристроїв підключаються до однієї точки доступу. Однак можливості Wi-Fi цим не обмежуються.
Деякі пристрої можуть працювати в режимі «мосту», виконуючи функції повторювачів і розширюючи зону покриття мережі. Крім того, з’являються рішення, які дозволяють будувати mesh-мережі на основі Wi-Fi, де вузли взаємодіють між собою без жорсткої прив’язки до центральної точки доступу (наприклад, промислові рішення на кшталт *FL WLAN 1100*).

Окремо слід відзначити можливість організації роамінгу в Wi-Fi-мережах. Роумінгом називається конфігурація, у якій використовується кілька точок доступу з однаковим SSID, а клієнтський пристрій може переміщатися між ними, залишаючись у межах однієї безпроводової мережі. За умови коректного планування покриття це забезпечує безперервність зв’язку та зручність користування.

Технологія Trusted Wireless 2.0 також підтримує використання вузлів у ролі повторювачів, але, на відміну від класичних рішень, має вбудовані механізми автоматичного відновлення зв’язку. Якщо певний вузол втрачає з’єднання з основним маршрутом, він динамічно шукає альтернативний найближчий повторювач, через який може передавати дані. У результаті зв’язок відновлюється, а передавання інформації продовжується через резервний маршрут. Час відновлення може коливатися від мілісекунд до секунд залежно від обраної швидкості передавання даних.

Подібна архітектура, у якій маршрути формуються через довільно обрані проміжні вузли, називається mesh-топологією. Вона забезпечує високу живучість мережі, самовідновлення та адаптацію до змін радіообстановки.

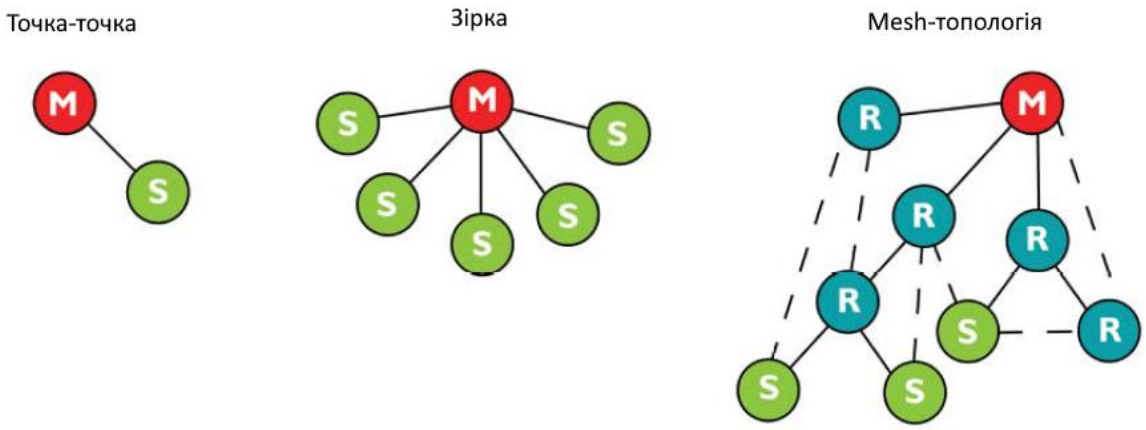


Рис. 2.5 Основні топології безпроводових мереж: «точка–точка», «зірка» та mesh-топологія, що ілюструють різні способи організації зв’язків між вузлами та рівень їхньої відмовостійкості

Окрім mesh-топології, пристрої з підтримкою Trusted Wireless 2.0 можуть працювати також у топологіях «точка–точка», «зірка» та «лінія», що робить цю технологію універсальною для різних сценаріїв застосування.

Через високу чутливість приймачів у Trusted Wireless 2.0 іноді виникає ситуація, коли вузол підключається не до найближчого повторювача, а до більш віддаленого, але з кращими радіопараметрами. Щоб уникнути небажаних конфігурацій, у системі передбачено механізми:

- «чорного списку повторювачів» (parent-black-listing) — перелік вузлів, з якими з’єднання заборонене;
- «білого списку повторювачів» (parent-white-listing) — перелік вузлів, які є пріоритетними для підключення.

За замовчуванням усі повторювачі дозволені, проте адміністратор мережі може гнучко керувати логікою маршрутизації.

У технології WirelessHART також використовується mesh-мережа, яка здатна об’єднувати до 254 кінцевих датчиків. Такий підхід добре підходить для

промислових систем автоматизації, де необхідні висока надійність, резервування маршрутів і стабільна робота в умовах складної радіообстановки.

Таким чином, вибір топології безпроводової мережі суттєво впливає на масштабованість, відмовостійкість і адаптивність системи, а сучасні промислові протоколи все частіше орієнтуються саме на mesh-архітектури як найбільш ефективні для складних умов експлуатації.

Характер взаємодії вузлів мережі

Внутрішній обмін даними між вузлами мережі є необхідним для підтримання стабільної роботи безпроводової мережі незалежно від обсягу корисної інформації, що передається. Саме тому процеси додавання нових вузлів, керування вже підключеними пристроями та обміну службовими повідомленнями відіграють ключову роль з точки зору надійності мережі, швидкості її відновлення та оптимізації загального трафіку.

У технології WirelessHART застосовується централізований підхід до керування вузлами. У мережі наявний спеціальний центральний елемент — менеджер, який ініціює всі запити до вузлів і приймає від них відповіді. Відповідно, значна частина службового та керуючого трафіку проходить через єдиний вузол мережі, що створює підвищене навантаження та потенційну точку відмови.
Аналогічну ситуацію можна спостерігати і в мережах Wi-Fi та Bluetooth. У цих технологіях основний обмін даними відбувається через точки доступу або центральні пристрої. Якщо така точка доступу виходить з ладу або втрачає живлення, взаємодія між пристроями стає неможливою, що негативно впливає на відмовостійкість мережі.

На відміну від цього, Trusted Wireless 2.0 реалізує розподілений підхід до керування мережею. Уся мережа поділяється на окремі зони «батько/нащадок» (англ. parent/child, P/C). У ролі *батьківського вузла* зазвичай виступає повторювач або центральний вузол певної гілки, через який до мережі підключаються інші повторювачі чи кінцеві пристрої — *нащадки*. У результаті формується ієрархічна деревоподібна структура.

Батьківський вузол несе відповідальність за всі безпосередньо підключені до нього нащадки, включаючи процес їх підключення, обмін службовою інформацією та контроль стану зв’язку. Важливою особливістю є те, що керуюча інформація не передається на центральний рівень мережі, а залишається в межах відповідної P/C-зони. Це дозволяє суттєво зменшити обсяг службового трафіку та підвищити масштабованість системи.

Процес підключення нового пристрою в Trusted Wireless 2.0 відбувається поетапно і локально в межах однієї P/C-зони:

- пошук найближчої станції шляхом прослуховування ефіру;
- синхронізація з обраним вузлом для подальшого передавання даних;
- перехід на алгоритм FHSS, який використовується в даному з’єднанні;
- надсилання запиту на підключення (join-request);
- отримання підтвердження підключення (join-acknowledge).

Усі ці дії виконуються локально, без залучення центрального керуючого елемента мережі. Для порівняння, у WirelessHART, через використання централізованої архітектури, підключення нового вузла вимагає 6–7 службових команд, які проходять через менеджер мережі. Навіть у простій мережі типу «точка–точка» процес приєднання може тривати близько 2 секунд, а повноцінний обмін даними розпочинається лише через 10 секунд.

У великих мережах, наприклад із 100 вузлів, кількість команд зростає до 600–700, а повний запуск мережі та початок стабільного обміну даними можуть тривати до 25 хвилин.

Додатково в межах кожної P/C-зони батьківський вузол здійснює збір і зберігання діагностичної інформації з усіх підлеглих пристроїв, що спрощує локальний моніторинг та аналіз стану мережі.

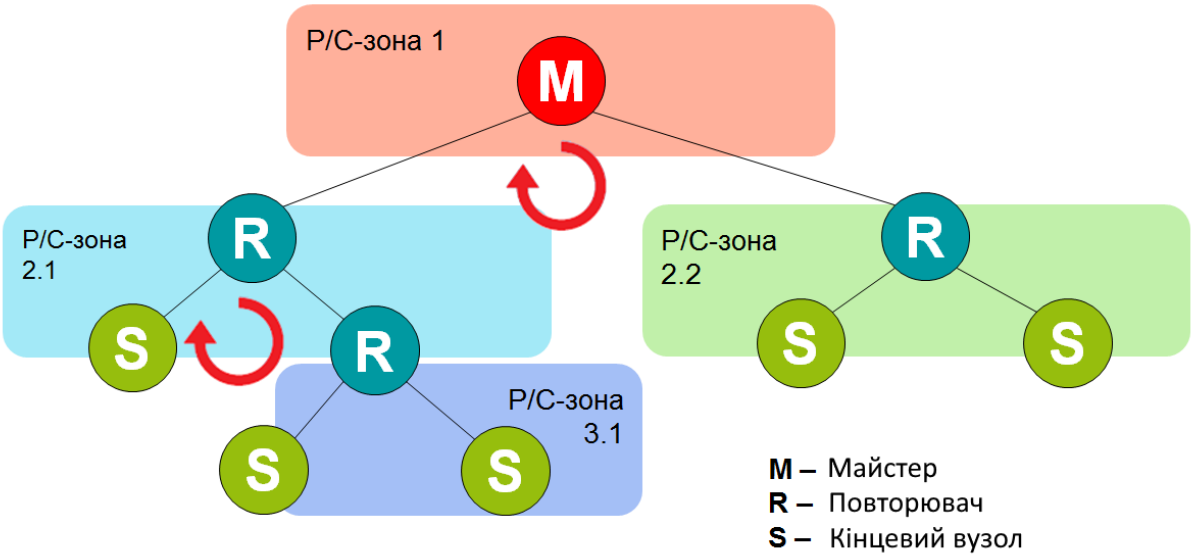


Рис. 2.6 Розбиття на зони батько/спадкоємець (parent/child – P/C)

Такий розподілений підхід також суттєво зменшує час сходимості мережі. У мережах із централізованим керуванням відмова або знеструмлення менеджера призводить до втрати інформації про топологію, і процес відновлення може бути тривалим і ресурсомістким.

Натомість у мережах на основі Trusted Wireless 2.0 керування та відновлення виконуються паралельно в різних гілках деревоподібної структури, що забезпечує швидке самовідновлення, високу живучість та стійкість до відмов окремих вузлів.

Отже, характер взаємодії вузлів є одним із ключових факторів, що визначає ефективність, масштабованість і надійність безпроводових мереж, особливо у промислових застосуваннях із великою кількістю пристроїв.

Узагальнення та роль методів виявлення і фільтрації завад

Отже, у підсумку можна зробити такий висновок: Trusted Wireless і WirelessHART, хоча й поступаються Wi-Fi та Bluetooth за швидкістю передавання даних, у багатьох випадках телекомунікаційних застосувань це не є вирішальним недоліком. На практиці безпроводові технології часто використовуються не для передавання великих обсягів інформації, а як заміна або розширення кабельних ліній, які з технічних, економічних або фізичних причин неможливо прокласти.

У таких сценаріях зазвичай виникає потреба передавати дискретні та аналогові сигнали, а також здійснювати збір телеметричних даних. Для цього

високі швидкості передавання не є критичними. Аналогічна ситуація спостерігається під час організації зв’язку з віддаленими телекомунікаційними вузлами або підсистемами, які обмінюються даними за протоколами на кшталт PROFIBUS DP або Modbus RTU. Ці протоколи в більшості випадків не висувають жорстких вимог до пропускної здатності каналу, однак самі об’єкти можуть розташовуватися на значній відстані.

У таких умовах Wi-Fi та Bluetooth виявляються менш придатними, оскільки вони не забезпечують стабільного передавання даних на великі дистанції, а їх налаштування при дальностях понад 1 км є складним і трудомістким процесом. Натомість Trusted Wireless, завдяки невисокій швидкості передавання, але високій енергетичній ефективності, демонструє стабільну роботу на великих відстанях і добре підходить для подібних телекомунікаційних задач.

Водночас у телекомунікаційних системах першочергове значення мають не швидкість, а надійність передавання даних і сумісність з іншими безпроводовими технологіями, що працюють у тому самому радіочастотному середовищі. Саме в цьому аспекті Trusted Wireless і WirelessHART мають суттєві переваги. Завдяки використанню FHSS та механізмів «чорних списків» частот або каналів, ці технології забезпечують високу завадостійкість і дозволяють ефективно співіснувати з іншими безпроводовими системами без істотного погіршення якості зв’язку.

Особливу роль у телекомунікаційних мережах відіграють методи аналізу сигналів для виявлення та фільтрації завад. У реальних умовах радіоефір є нестаціонарним: рівень шумів, інтерференцій та імпульсних перешкод може змінюватися в часі. У таких ситуаціях вейвлет-аналіз є ефективним інструментом, який дозволяє:

- виявляти короткочасні та нестаціонарні завади у безпроводових каналах;
- локалізувати перешкоди одночасно в часовій і частотній областях;
- виконувати фільтрацію завад без суттєвого спотворення корисного сигналу;
- оцінювати ефективність таких механізмів, як FHSS, з точки зору реального придушення інтерференцій.

Застосування вейвлет-аналізу дає змогу більш глибоко оцінити переваги Trusted Wireless і WirelessHART у складному радіочастотному середовищі та підтвердити їхню високу надійність у телекомунікаційних системах, де стабільність зв’язку є критично важливою.

Водночас це не означає, що Wi-Fi або Bluetooth не знаходять застосування у телекомунікаційній сфері. Ці технології досить широко використовуються, але для інших типів задач — передавання великих обсягів даних на невеликі відстані, наприклад у телекомунікаційних центрах обробки даних, серверних приміщеннях або під час автоматизації великих залів із високою щільністю обладнання. Таким чином, кожна технологія має власну нішу застосування, а вибір оптимального рішення залежить від вимог до дальності, надійності, завадостійкості та умов роботи мережі.

3 ПЕРЕДАЧА ДАНИХ ПО ЗАШУМЛЕНИХ КАНАЛАХ

3.1 Технології передачі даних

На фізичному рівні передавання інформації можуть застосовуватися різні технології та середовища: передавання електричних сигналів по провідниках, світлових імпульсів по оптоволокну, звукових коливань у повітрі або під водою, а також електромагнітних хвиль у безпроводових каналах зв’язку. Незалежно від обраної технології, усі системи стикаються зі спільною фундаментальною проблемою — обмеженням дальності та якості зв’язку через наявність паразитного шуму і завад у каналі передавання.

У реальних умовах сигнал, що надходить на приймач, може бути настільки зашумленим, що виділення корисної інформації стає вкрай складним або навіть здається неможливим. Джерелами таких спотворень можуть бути теплові шуми, інтерференція з іншими передавачами, імпульсні перешкоди, багатопроменеве поширення, а також навмисно створені періодичні завади.

Частково ця проблема вирішується класичними методами обробки сигналів, зокрема:

- синхронним детектуванням, яке дозволяє підвищити відношення сигнал/шум за умови точної синхронізації;
- методами розширення спектра (DSSS, FHSS), що зменшують вплив вузькосмугових завад;
- накопиченням періодичних сигналів, яке дає змогу підсилити корисну складову за рахунок її повторюваності.

Однак ефективність цих підходів істотно знижується, якщо в каналі присутня значна низькочастотна складова шуму, або якщо частотний діапазон корисного сигналу перекривається потужними періодичними завадами. У таких ситуаціях класичні фільтри та спектральні методи стають малоефективними, оскільки вони не здатні чітко відокремити корисний сигнал від шуму, що має близькі або змінні частотні характеристики.

У цьому контексті особливу цінність набуває вейвлет-аналіз, який є потужним інструментом для виявлення та фільтрації завад у безпроводових каналах зв’язку. На відміну від класичних спектральних методів, вейвлет-перетворення дозволяє:

- аналізувати сигнали одночасно в часовій і частотній областях;
- виявляти нестаціонарні, короткочасні та імпульсні завади, характерні для реального радіоефіру;
- розділяти корисний сигнал і шум за масштабами, навіть якщо їхні частотні діапазони частково перекриваються;
- виконувати адаптивну фільтрацію, зберігаючи структуру корисного сигналу та пригнічуючи завади.

Особливо ефективним вейвлет-аналіз є у випадках, коли завади мають низькочастотний або періодичний характер, а корисний сигнал є короткочасним, імпульсним або псевдовипадковим. Завдяки багатомасштабному поданню сигналу стає можливим виділяти інформативні компоненти навіть у дуже складних умовах зашумлення.

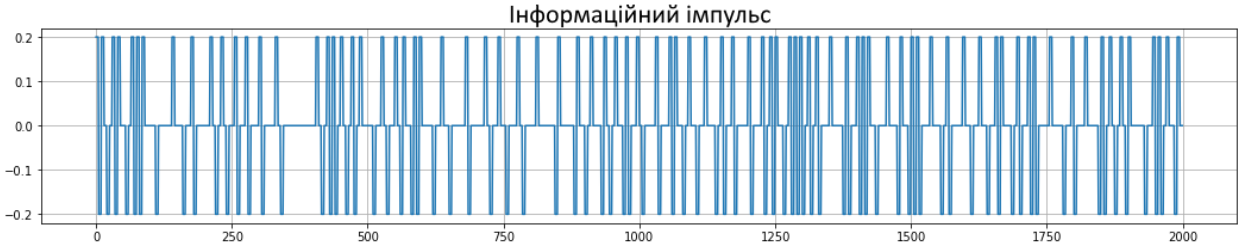


Рис. 3.1 Використання інформаційного імпульсу

Одним із підходів до подолання описаних проблем є використання інформаційних імпульсів із псевдовипадковим профілем. Такі сигнали:

- мають широкий спектр;
- слабко корелюють із більшістю типових завад;
- добре піддаються обробці методами кореляції та вейвлет-аналізу.

У поєднанні з вейвлет-перетворенням псевдовипадкові сигнали дозволяють ефективно виявляти корисну інформацію навіть за дуже низького відношення сигнал/шум, що робить цей підхід особливо перспективним для безпроводових

телекомунікаційних систем, які працюють у складній та динамічній радіообстановці.

Таким чином, застосування вейвлет-аналізу разом із псевдовипадковими інформаційними сигналами відкриває широкі можливості для підвищення завадостійкості, надійності та якості передавання даних у сучасних безпроводових каналах зв’язку.

Формування та обробка псевдовипадкових інформаційних імпульсів

Інформаційний імпульс, що використовується для передавання даних у зашумлених безпроводових каналах зв’язку, характеризується такими основними параметрами:

- амплітуда імпульсу — 0,2 умовних одиниці;
- кількість пічків — 200;
- тривалість одного пічка — 5;
- загальна тривалість імпульсу — 2000.

Завдяки такій структурі формується складний у часовій області сигнал, який має значну внутрішню надмірність і псевдовипадковий характер. Саме ці властивості є визначальними для підвищення завадостійкості та ймовірності коректного приймання інформації.

Механізм накопичення енергії та пригнічення завад

На перший погляд може здатися, що такі імпульси, як і будь-які інші, за слабкого сигналу губляться в шумі. Проте ключова ідея полягає у спеціальному алгоритмі декодування.

Знакове підсумовування пічків

Під час обробки сигналу виконується:

- підсумовування позитивних пічків зі знаком «+»;
- підсумовування негативних пічків зі знаком «−».

У результаті:

- випадкові шумові складові, які не корельовані з ключем, взаємно компенсуються;
- періодичні та навмисні завади також значною мірою придушуються;

- корисна складова сигналу накопичується когерентно.

Порогова реєстрація імпульсу

Після накопичення формується сумарна величина, яка:

- у багато разів перевищує амплітуду одного пічка;
- порівнюється з наперед заданим порогом відсічення шуму.

Якщо поріг перевищено, імовірність правильної реєстрації імпульсу стає близькою до 1, навіть за дуже низького відношення сигнал/шум.

Порівняння з відомими методами

Запропонований підхід має спільні риси з відомими технологіями, але також містить принципові відмінності.

Подібність до CDMA / DSSS

Спільні риси:

- використання псевдовипадкових структур;
- накопичення енергії корисного сигналу;
- висока завадостійкість.

Відмінності:

- відсутність несучої частоти, що усуває вразливість до вузькосмугових завад;
- складність навмисного глушіння сигналу.

Аналогія з радіолокаційним когерентним накопиченням

Спільні риси:

- багаторазове накопичення корисної інформації;
- підвищення відношення сигнал/шум.

Ключова відмінність:

- накопичення здійснюється не періодично, а відповідно до псевдовипадкової послідовності (ПСП), що усуває вразливість до завад на частоті повторення імпульсів.

Роль вейвлет-аналізу у виявленні та фільтрації завад

Використання вейвлет-аналізу значно підсилює ефективність описаного підходу, особливо в умовах нестаціонарного радіоінтерференційного середовища. Вейвлет-перетворення дозволяє:

- локалізувати пічки та імпульси в часі та за масштабами;
- відокремлювати корисні компоненти від:
  - низькочастотних завад;
  - періодичних інтерференцій;
  - імпульсного шуму;
- виконувати порогову обробку вейвлет-коефіцієнтів без втрати структури сигналу;
- реалізовувати багатомасштабне накопичення енергії.

3.2 Методи кодування та декодування

Нижче наведено два фрагменти сигналу, які потенційно можуть надходити до приймального тракту системи зв’язку. Перший фрагмент відповідає чистому гауссовому випадковому шуму, тоді як другий містить той самий шум, але з накладеним псевдовипадковим інформаційним імпульсом. Порівняння цих двох випадків є принципово важливим для аналізу можливостей виявлення корисного сигналу в умовах сильних завад.

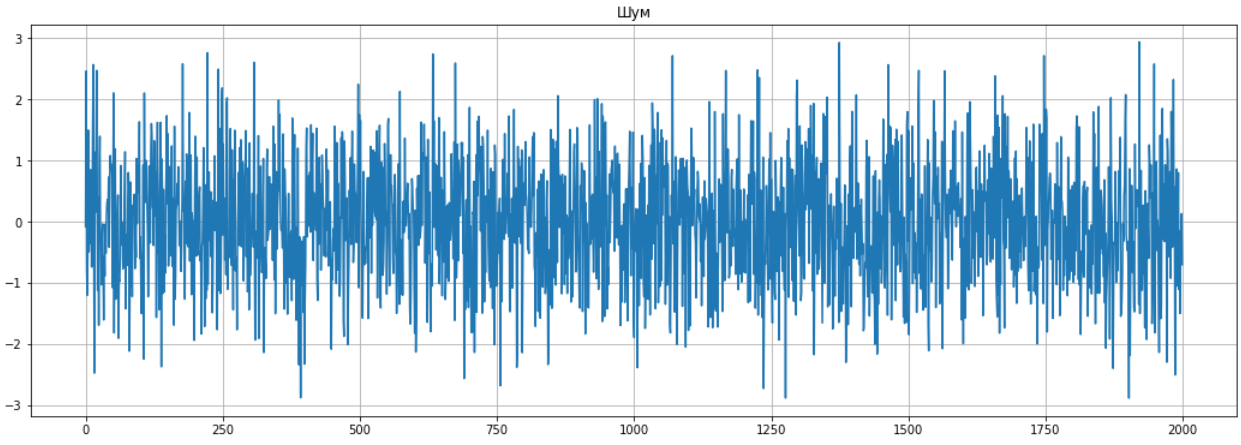


Рис. 3.2 Відрізок гаусового шуму (СКЗ = 1)

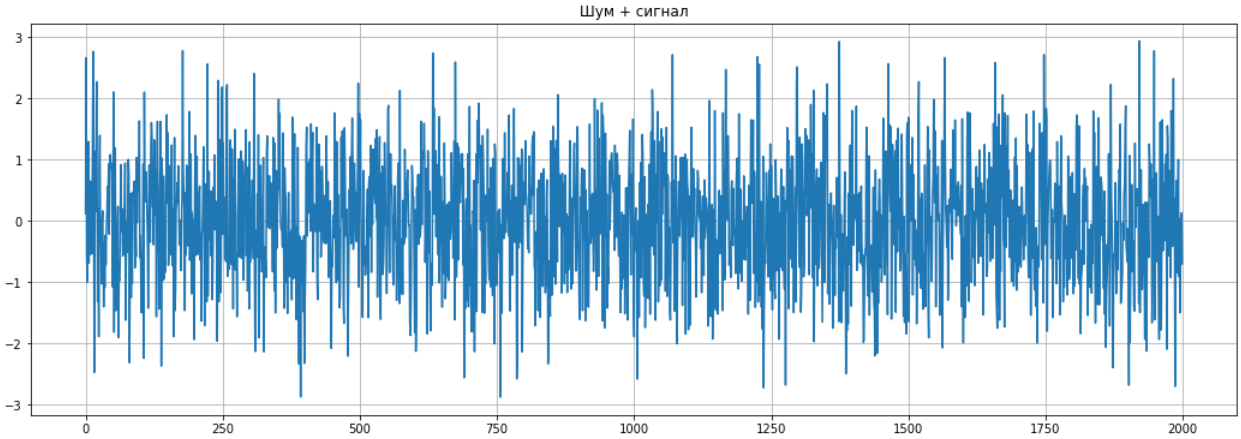


Рис. 3.3 Відрізок гаусового шуму з накладеним імпульсом

Генерація шумової складової здійснювалася в діапазоні значень (−3; 3) за умови, що середньоквадратичне значення (СКЗ) дорівнює 1. Такий вибір параметрів відповідає класичній моделі гауссового білого шуму, яка широко використовується для моделювання завад у безпроводових каналах зв’язку та телекомунікаційних системах.

Оскільки для нормального (гауссового) розподілу великі амплітудні викиди мають дуже малу ймовірність, їхній вплив на загальну статистику сигналу є незначним. З цієї причини такі поодинокі екстремальні значення можна знехтувати або відфільтрувати без істотної втрати інформативності моделі. Це спрощує подальший аналіз і дозволяє зосередитися на типовій поведінці шуму та його взаємодії з корисним сигналом.

Накладення псевдовипадкового імпульсу на шумовий фон призводить до появи в сигналі структурованої складової, яка за амплітудою може бути співмірною з рівнем шуму і тому візуально майже не відрізняється від нього в часовій області. Саме такі ситуації є найбільш складними для класичних методів детектування.

У подальшому аналізі подібні сигнали є зручним тестовим прикладом для демонстрації ефективності кореляційних методів та вейвлет-аналізу, які дозволяють:

- виявляти приховані імпульси на фоні гауссового шуму;
- відокремлювати корисну складову за її часово-масштабними ознаками;

- оцінювати ймовірність помилкової детекції та достовірність приймання інформації.

Таким чином, розглянуті фрагменти сигналів створюють наочну основу для подальшого дослідження методів виявлення та фільтрації завад у безпроводових каналах зв’язку.

Візуально відрізнити фрагмент чистого шуму від шуму з накладеним інформаційним імпульсом практично неможливо. У часовій області обидва сигнали мають схожий хаотичний характер, а амплітуда псевдовипадкового імпульсу є співмірною з рівнем шуму, що повністю маскує його на фоні завад. Навіть за уважного аналізу часових реалізацій людське око не здатне надійно ідентифікувати наявність корисної складової.

Аналогічна ситуація спостерігається і при застосуванні класичних статистичних методів аналізу. Основні статистичні характеристики, такі як середнє значення, дисперсія або середньоквадратичне відхилення, майже не змінюються при накладенні імпульсу на гауссовий шум. Це пов’язано з тим, що імпульс має псевдовипадкову структуру і займає порівняно невелику частину сигналу, тому його внесок у загальну статистику є мінімальним.

Для наочного підтвердження цього факту нижче наведено гістограми амплітудних значень та автокореляційні функції (АКФ) для двох випадків:

- гауссового випадкового шуму;
- шуму з накладеним псевдовипадковим імпульсом.

Побудовані гістограми демонструють практично ідентичні розподіли, які добре відповідають нормальному закону. Водночас автокореляційні функції також не виявляють істотних відмінностей, оскільки псевдовипадковий імпульс не формує вираженої періодичної структури та не порушує загальної кореляційної картини шуму.

Таким чином, ані візуальний аналіз, ані традиційні статистичні показники не дозволяють надійно виявити присутність корисного імпульсу. Це підкреслює необхідність застосування більш інформативних методів аналізу, зокрема кореляційної обробки та вейвлет-аналізу, які здатні використовувати локальні

часово-масштабні особливості сигналу та забезпечувати ефективне виявлення прихованих інформаційних компонент навіть за дуже низького відношення сигнал/шум.

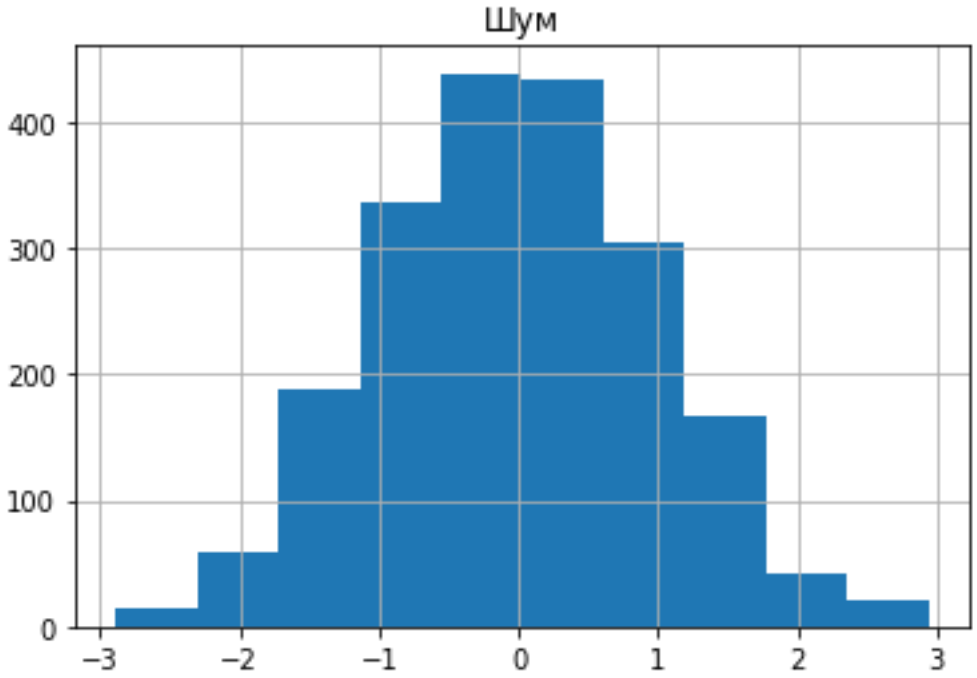


Рис. 3.4 Гістограма гауссового шуму (СКЗ = 1, всього 2000 пікселів)

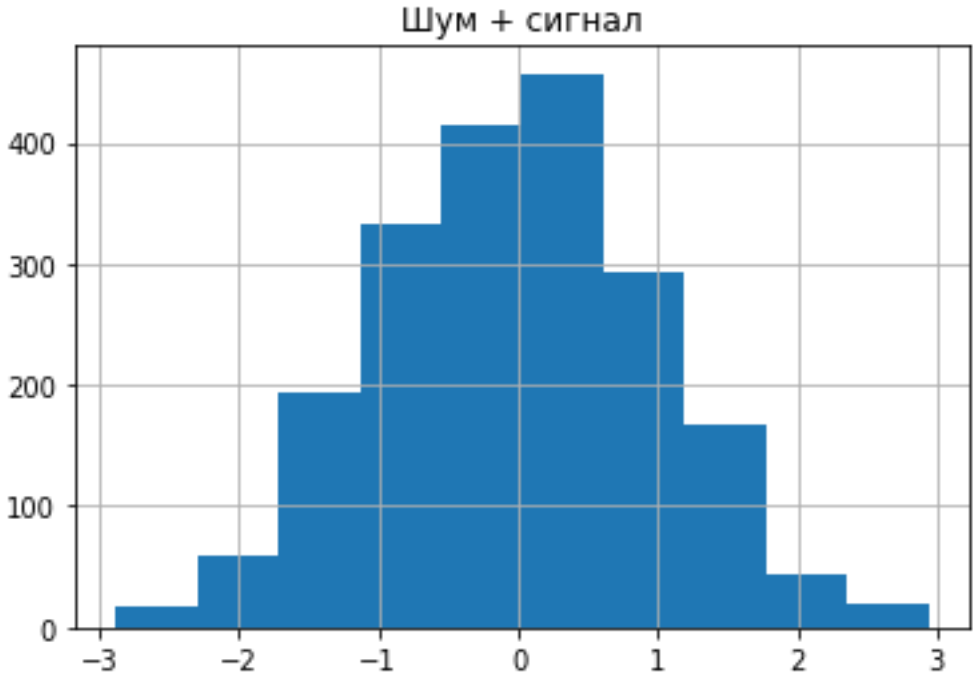


Рис. 3.5 Гістограма шуму з накладеним імпульсом

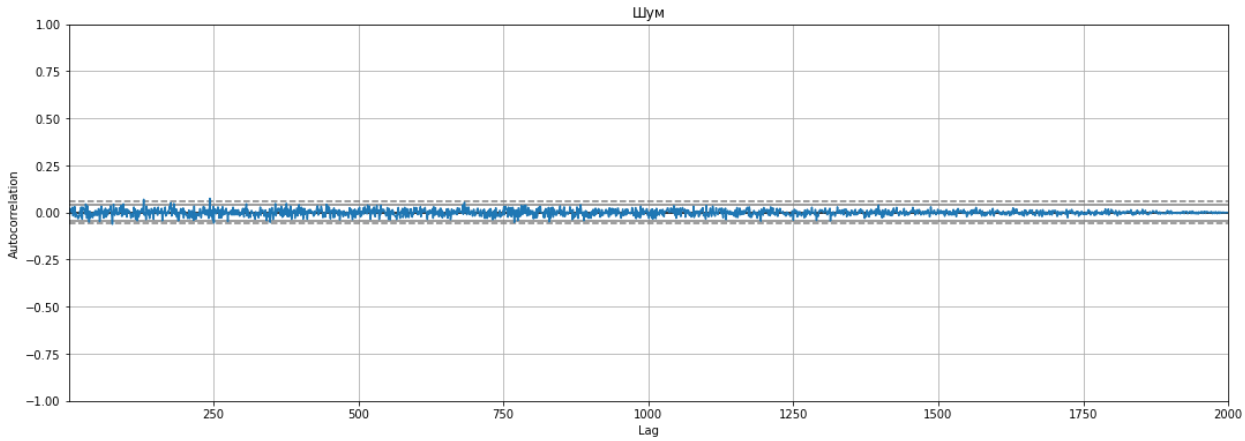


Рис. 3.6 АКФ шуму

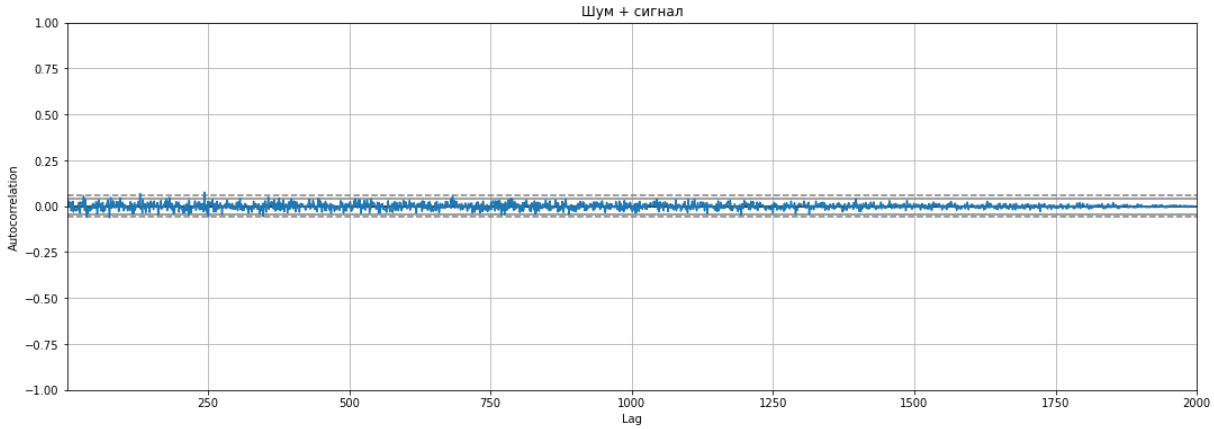


Рис. 3.7 АКФ шуму з накладеним імпульсом

Під час підсумовування ділянок сигналу, що містять псевдовипадковий імпульс, і які відповідають окремим пічкам, спостерігається принципово різна поведінка корисної та шумової складових. На відміну від шуму, для якого підсумовування призводить переважно до взаємної компенсації випадкових коливань, сума амплітуд пічків інформаційного імпульсу монотонно зростає. У результаті така сума може досягати значення близько 40 умовних одиниць.

Імовірність того, що сума лише шумових компонент випадково досягне подібної величини, є вкрай малою. Це пояснюється випадковим характером шуму та відсутністю кореляції між його відліками на різних часових інтервалах. Тому навіть за значного рівня зашумлення каналу накопичення корисного сигналу відбувається значно ефективніше, ніж накопичення шуму.

Під час проведення розрахунків було обрано порогове значення відсічення сумарного шуму, яке становить 20 умовних одиниць. Такий вибір забезпечує

надійний компроміс між ймовірністю хибного спрацювання та достовірністю виявлення інформаційного імпульсу. При цьому шумова компонента визначається як середнє арифметичне значення шуму в межах тривалості одного пічка, яка дорівнює 5 умовних одиниць часу. Усереднення на такому інтервалі додатково зменшує вплив високочастотних випадкових коливань.

Отже, навіть якщо в окремих пічках шум за амплітудою перевищує корисну складову, знакове та когерентне накопичення забезпечує впевнений вихід сумарного сигналу за встановлений поріг, тоді як шум залишається значно нижче цього рівня.

Таким чином, описаний спосіб організації завадостійкого зв’язку дозволяє не лише суттєво збільшити дальність передавання інформації за фіксованих значень потужності передавача та чутливості приймача, але й надає каналу зв’язку додаткову властивість — малопомітність. Оскільки інформаційний сигнал маскується під шум і не має виражених спектральних або часових ознак, його виявлення сторонніми засобами стає надзвичайно складним.

У поєднанні з методами кореляційної обробки та вейвлет-аналізу такий підхід забезпечує ефективне виявлення корисної інформації на фоні завад, підвищує енергетичну ефективність системи зв’язку й робить її придатною для застосування в складних безпроводових телекомунікаційних середовищах із низьким відношенням сигнал/шум.

3.3 Обмеження способу

Наведений підхід до організації зв’язку має низку технічних обмежень і вимог, які необхідно враховувати під час практичної реалізації. Водночас ці особливості не лише окреслюють межі застосування методу, а й підкреслюють його потенціал у поєднанні з вейвлет-аналізом для виявлення та фільтрації завад у безпроводових каналах зв’язку.

По-перше: синхронізація часу між передавачем і приймачем

Однією з ключових вимог є точна синхронізація годинників передавальної та приймальної сторін. Приймач повинен знати або принаймні оцінювати ті моменти часу, у які необхідно розпочинати математичну обробку вхідного сигналу з метою виявлення інформаційних імпульсів.

Чим краща синхронізація, тим вищу швидкість передавання можна забезпечити, оскільки з’являється можливість використовувати коротші імпульси та збільшувати їх кількість за одиницю часу.

Найбільш ефективним технічним рішенням є використання компактних атомних годинників, однак на практиці цілком придатними є й кварцові генератори, особливо за умови:

- періодичного коригування за супутниковими сигналами навігаційних систем;
- синхронізації шляхом передавання службових повідомлень, що містять поточний час передавача.

Додатково вимоги до синхронізації можуть бути знижені на алгоритмічному рівні. Зокрема, замість фіксованого моменту старту обробки може використовуватися ковзне часове вікно, визначене допустимою різницею ходу годинників передавача і приймача. У межах цього вікна виконується послідовність операцій сумування сигналу зі зсувами за часом, меншими за тривалість одного пічка, доти, доки інформаційні сплески не почнуть надійно реєструватися.

У цьому контексті вейвлет-аналіз відіграє важливу роль, оскільки дозволяє:

- локалізувати імпульси у часово-масштабному просторі навіть за неточної синхронізації;
- виявляти максимум енергії імпульсу при різних часових зсувах;
- зменшувати вплив шуму під час пошуку оптимального моменту синхронізації.

По-друге: знання відстані між передавачем і приймачем

Ще одним важливим фактором є необхідність достатньо точно знати відстань між передавачем і приймачем. Під час поширення сигналу виникає часова затримка, яка повинна враховуватися при обчисленнях та синхронізації часових міток.

Ця вимога є особливо актуальною для повільних типів зв’язку, наприклад акустичних каналів, де затримка поширення може бути співмірною з тривалістю самих інформаційних імпульсів. У безпроводових радіоканалах ця проблема менш виражена, проте за великих відстаней або високої точності вимірювань вона також не може бути знехтувана.

Вейвлет-аналіз у цьому випадку може використовуватися для:

- оцінювання часових зсувів за максимумами енергії вейвлет-коефіцієнтів;
- адаптивного коригування моментів початку обробки сигналу;
- компенсації невизначеностей, пов’язаних із затримкою поширення.

По-третє: вплив середовища поширення сигналу

Середовище поширення може впливати на швидкість сигналу, причому в деяких випадках — динамічно. Температура, вологість, щільність середовища, багатопроменеве поширення або рухомі об’єкти можуть змінювати ефективну затримку сигналу в часі.

Ці ефекти ускладнюють точне визначення часових параметрів і вимагають адаптивних методів обробки. Вейвлет-аналіз є особливо корисним у таких умовах, оскільки:

- дозволяє аналізувати сигнал на різних масштабах;
- зберігає чутливість до короткочасних змін структури сигналу;
- дає змогу відокремлювати корисні імпульси від завад, зумовлених середовищем.

По-четверте: обмеження за потужністю та чутливістю

Не менш важливими є обмеження за потужністю передавача та чутливістю приймача. Ці фактори є спільними для всіх технологій зв’язку. Якщо амплітуда пічків інформаційного імпульсу в точці приймання стає нижчою за поріг чутливості приймача, який визначається типом антени та якістю приймального тракту, то в процесі накопичення фактично підсумовуватиметься лише шум.

Саме тут поєднання когерентного накопичення з вейвлет-фільтрацією набуває вирішального значення. Вейвлет-методи дозволяють:

- пригнічувати шум ще до етапу підсумовування;

- виділяти масштабні компоненти, характерні саме для інформаційних імпульсів;
- підвищувати ефективну чутливість приймального алгоритму без збільшення апаратної потужності.

Узагальнення та сфера застосування

Перераховані обмеження безпосередньо впливають на швидкість передавання та відносну складність організації зв’язку за таким підходом. Однак вони не є критичними для низки прикладних задач. Навпаки, описаний метод може зайняти власну нішу застосування у випадках, коли потрібен:

- дальнодіючий зв’язок;
- малопомітний або прихований канал передавання;
- висока завадостійкість за низького відношення сигнал/шум;
- невисокі вимоги до швидкості передавання.

У поєднанні з вейвлет-аналізом для виявлення та фільтрації завад такий підхід дозволяє будувати ефективні безпроводові канали зв’язку, здатні працювати в складному, нестаціонарному та зашумленому радіоінтерференційному середовищі.

4 ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ КАНАЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

Передавання інформації радіоканалом завжди відбувається в умовах дії шумів і завад різної природи, які неминуче погіршують якість і надійність зв’язку. До таких факторів належать теплові шуми приймального тракту, інтерференція від інших передавачів, багатопроменеве поширення сигналів, а також навмисні (активні) завади. Для зменшення їхнього негативного впливу протягом тривалого часу було розроблено значну кількість методів і алгоритмів, однак жоден із них не є універсальним або оптимальним для всіх умов експлуатації. Особливо складною є ситуація за наявності цілеспрямованих завад, коли гарантувати наперед задану завадостійкість практично неможливо.

У зв’язку з цим на практиці широко застосовуються підоптимальні методи захисту від активних завад, які забезпечують прийнятний компроміс між складністю реалізації та ефективністю. До таких методів належать:

- перебудова несучої частоти;
- зміна частоти повторення імпульсів;
- варіювання тривалості та форми імпульсів;
- адаптація параметрів модуляції до поточної завадової обстановки.

Зокрема, випадкова зміна коду фазової модуляції від імпульсу до імпульсу дозволяє знизити флуктуаційні складові помилок приблизно на 20–30 %, що є суттєвим виграшем у зашумлених каналах. Одним із найбільш поширених і добре досліджених способів підвищення завадостійкості є передавання інформації з псевдовипадковою перебудовою робочої частоти (FHSS). У поєднанні з методом прямого розширення спектра (DSSS) цей підхід виявляється особливо ефективним для:

- боротьби з ефектом замирання, спричиненим багатопроменевим поширенням;
- роботи в умовах інтенсивних і навмисних завад;
- зменшення впливу вузькосмугових інтерференцій.

Для побудови завадостійких радіоканалів також активно використовуються сигнали з ортогональним частотним мультиплексуванням (OFDM) та їх удосконалена різновидність — COFDM (Coded OFDM), у якій поєднуються методи канального кодування та OFDM. COFDM-сигнали характеризуються:

- високою стійкістю до багатопроменевих спотворень;
- ефективним використанням спектра;
- відносно простою апаратною реалізацією завдяки застосуванню швидких перетворень Фур'є.

Водночас COFDM має і певні недоліки. До них належать:

- високі вимоги до точності синхронізації приймача;
- підвищені вимоги до лінійності підсилювачів передавача, зумовлені великим піковим фактором сигналу.

Важливою перевагою технології COFDM є можливість використання потужних завадостійких кодів, зокрема каскадних кодів БЧХ, а також сучасних LDPC-кодів, які широко застосовуються в стандартах цифрового телебачення DVB-S2 та DVB-T2. Комбінація кодів Ріда–Соломона з LDPC-кодами дозволяє забезпечувати працездатність радіоканалу навіть за відношення сигнал/шум близько 2 дБ, що є надзвичайно низьким значенням для практичних систем зв'язку.

Окремим і перспективним напрямом розвитку цифрової обробки сигналів у радіоканалах є застосування нейронних мереж. Наразі приймачі на основі нейронних мереж ще не здатні забезпечити ймовірність бітової помилки, нижчу за ту, яку демонструють оптимальні класичні приймачі. Проте їхньою суттєвою перевагою є здатність зберігати працездатність за дуже високих рівнів завад, а також адаптуватися до складних і нестаціонарних умов радіоканалу.

Таким чином, сучасні системи радіозв'язку використовують комплексний підхід до забезпечення завадостійкості, поєднуючи методи розширення спектра, адаптивної модуляції, канального кодування, багаточастотного передавання та інтелектуальної обробки сигналів. Саме така багаторівнева стратегія дозволяє досягати прийнятної надійності зв'язку навіть у складних і зашумлених умовах реального радіоефіру.

4.1 Використання голографічного кодування для підвищення надійності каналу зв'язку

Для подальшого підвищення завадостійкості безпроводових каналів зв’язку, особливо в умовах інтенсивних та навмисних активних завад, необхідне застосування методів, які перевищують можливості класичних схем модуляції та канального кодування. Одним із таких перспективних підходів є голографічне кодування, яке демонструє високу стійкість до завад різної природи та здатність до відновлення інформації навіть за значних спотворень сигналу.

Підвищена завадостійкість і коригувальна здатність голографічного коду ґрунтуються на використанні фундаментальної властивості голограм — делимості (розподіленості інформації). Згідно з цією властивістю, повна інформація про об’єкт розподіляється по всьому об’єму голограми, що дозволяє відновити зображення або дані навіть за наявності лише невеликого фрагмента голограми. Саме ця особливість робить голографічне кодування надзвичайно привабливим для систем зв’язку, які працюють у зашумленому або агресивному радіочастотному середовищі.

Для реалізації голографічного кодування блок цифрових даних подається у вигляді віртуального оптичного об’єкта. Для цього:

- формується цифрове представлення даних у двовимірному або багатовимірному просторі;
- для цього об’єкта обчислюється цифрова голограма (наприклад, за допомогою дискретного перетворення Фур’є або інших ортогональних перетворень);
- отримана голограма передається безпроводовим каналом зв’язку.

На приймальній стороні виконується зворотне голографічне перетворення, у результаті якого відбувається відновлення початкового блоку даних. Навіть якщо голограма була сильно спотворена шумом, інтерференціями або навмисними завадами, інформація може бути відновлена з високою ймовірністю завдяки її розподіленому характеру.

Голографічне кодування природним чином поєднується з методами виявлення та фільтрації завад, зокрема з вейвлет-аналізом, який широко застосовується у безпроводових каналах зв’язку. Це поєднання є особливо ефективним з таких причин:

- голограма містить інформацію на різних просторових і спектральних масштабах, що добре узгоджується з багатомасштабною природою вейвлет-перетворення;
- вейвлет-аналіз дозволяє локалізувати завади одночасно в часі та частоті, що дає змогу вибірково пригнічувати шумові компоненти голограми;
- порогова обробка вейвлет-коефіцієнтів дозволяє фільтрувати імпульсні, вузькосмугові та низькочастотні завади без істотної втрати інформаційної складової;
- навіть у разі часткової втрати або сильного спотворення фрагментів голограми залишкова інформація достатня для відновлення даних.

Таким чином, вейвлет-фільтрація може розглядатися як попередній або проміжний етап обробки, який підвищує ефективність голографічного декодування в складних умовах радіообстановки.

Способи використання голографічного кодування

На практиці можна виділити два основні підходи до використання голографічного кодування в системах зв’язку:

1. Голографічне кодування в цифровому каналі
   У цьому випадку голограма передається як цифрова послідовність символів. Основними перевагами такого підходу є:
   - висока коригувальна здатність;
   - сумісність із сучасними цифровими модуляціями та канальними кодами;
   - можливість інтеграції з адаптивними алгоритмами виявлення завад.
2. Спектральне голографічне кодування в аналоговому каналі
   Тут інформація розподіляється по спектру сигналу у вигляді голографічної структури. Такий підхід:

- забезпечує додаткову маскування інформації;
- підвищує стійкість до вузькосмугових і навмисних завад;
- добре поєднується з методами спектрального аналізу та вейвлет-перетворення.

4.2 Голографічне кодування цифрового каналу

У даному випадку розглядається цифровий канал зв’язку, в якому передавання інформації здійснюється у вигляді кодових слів, сформованих за допомогою голографічного кодування. При цьому спосіб організації фізичного та аналогового рівнів каналу (тип і параметри модуляції, робочий частотний діапазон, потужність передавача, характеристики антенної системи тощо) не аналізується і не змінюється. Такий підхід дозволяє зосередитися виключно на впливі методів кодування та декодування на завадостійкість цифрового каналу.

Усі процеси, що відбуваються в аналоговому каналі та призводять до спотворення переданої інформації — адитивний випадковий шум, імпульсні та навмисні завади, міжсимвольна інтерференція, багатопроменеве поширення, завмирання сигналу, часткові втрати енергії — у підсумку проявляються на цифровому рівні у вигляді бітових помилок. Саме тому для інтегральної оцінки ступеня спотворень, незалежно від їх фізичної природи, доцільно використовувати інтенсивність бітових помилок — показник BER (Bit Error Rate), який є універсальним критерієм якості цифрового каналу зв’язку.

Принцип голографічного кодування в цифровому каналі

Голографічне кодування полягає в обчисленні цифрової голограми для k-розрядного блоку вхідних даних X і виконується у два послідовні етапи.

Перший етап — формування вторинного блоку

Початковий блок даних X, який містить *k* бітів, перетворюється у вторинний блок A, що складається з $n = 2^k$ точок A(i), i = 1,…, n.

При цьому значення елементів блоку A визначаються таким чином:

- A(i) = 1, якщо i = X;

- A(i) = 0, якщо i ≠ X.

Таким чином, блок A є одновимірним масивом, у якому лише одна позиція містить одиницю, а всі інші — нуль. З фізичної точки зору такий масив інтерпретується як віртуальний точковий оптичний об’єкт, розташований у позиції X на «чорному фоні».

Другий етап — обчислення цифрової голограми

Для сформованого віртуального оптичного об’єкта обчислюється одновимірна цифрова голограма — масив H(i), i = 1,…, n, який є результатом інтерференції хвильового фронту на віртуальному екрані. Отримані значення голограми далі підлягають бінаризації:

- додатні значення приймаються за 1;
- від’ємні значення — за 0.

У результаті формується n-бітний одномірний масив HO(j), який і є кодовою комбінацією, що відповідає k-розрядному вхідному блоку X.

Важливою особливістю цього процесу є те, що округлення значень голограми не вносить цифрового шуму округлення, оскільки інформація закладена не в амплітудних значеннях елементів голограми, а в положенні її центру. Саме координата максимуму несе корисну інформацію, що забезпечує високу стійкість до спотворень.

Передавання та декодування

Сформована n-бітна голограма HO(j) передається по цифровому каналу зв’язку. На приймальній стороні здійснюється зворотне голографічне перетворення (декодування), яке полягає у відновленні зображення за голограмою та визначенні координати точки з максимальною яскравістю. Саме ця координата і формує k-розрядний вихідний блок даних, що відповідає переданому значенню X.

Завдяки розподіленому характеру голографічного представлення інформації, навіть значні спотворення голограми не призводять до втрати даних, якщо зберігається загальна структура інтерференційної картини.

Оцінка ефективності голографічного кодування

Оцінювання ефективності голографічного кодування було виконано шляхом моделювання процесу передавання інформації каналом з помилками у середовищі MATLAB. У ході моделювання порівнювалися різні методи кодування за однакової швидкості коду R = 1/32, що забезпечує коректність порівняльного аналізу.

На відповідному графіку наведено залежності ймовірності безпомилкового декодування P від ймовірності бітової помилки в каналі BER для таких кодів:

- коду Ріда–Соломона;
- коду Ріда–Маллера;
- мажоритарного коду;
- голографічного коду.

Результати моделювання показали, що голографічне кодування забезпечує найвищу завадостійкість серед розглянутих методів. Зокрема, ймовірність правильного декодування перевищує 0,9999 навіть за рівня помилок у каналі BER ≈ 0,34, що є надзвичайно високим значенням для практичних систем зв’язку.

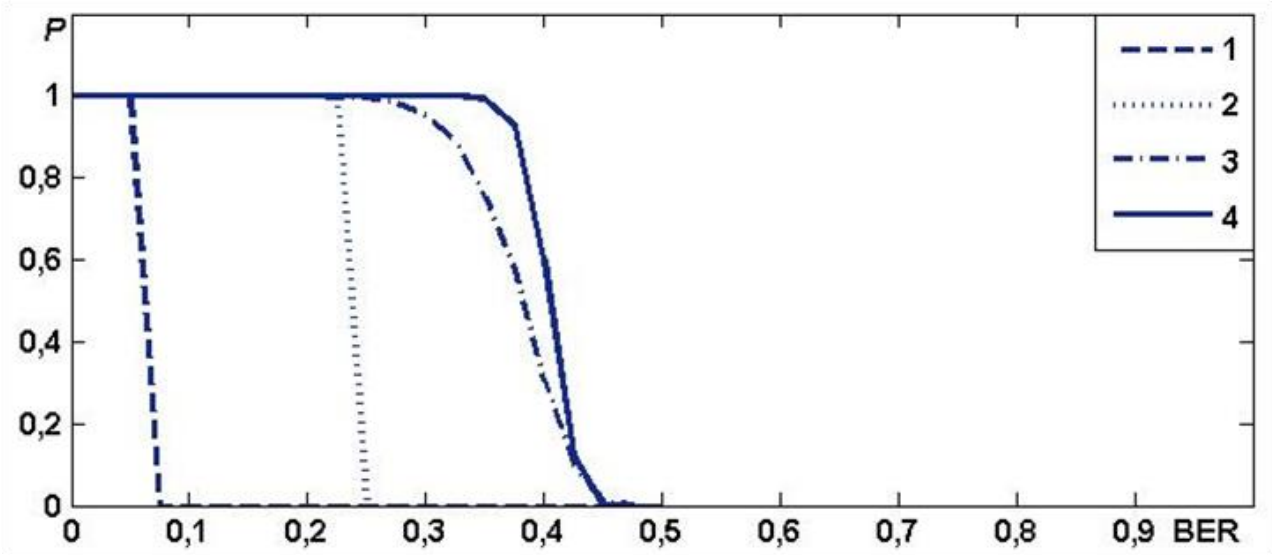


Рис. 4.1 Залежність ймовірності безпомилкового декодування P від ймовірності помилки на біт BER: 1 – РС-код, 2 – РМ-код, 3 – мажоритарний код, 4 – голографічний код

4.3 Спектральне голографічне кодування в аналоговому каналі

Термін «кодування» зазвичай використовується стосовно цифрових сигналів, однак у даному випадку він застосовується до аналогового сигналу, над яким виконується бінарна операція — амплітудна маніпуляція.

Спектральне голографічне кодування полягає у формуванні такого аналогового сигналу, спектральна форма якого відтворює одномірну цифрову голограму закодованого блоку даних. При цьому одномірна голограма є двійковою послідовністю заданої довжини, аналогічно до першого розглянутого способу кодування, і використовується як еталон для синтезу спектра передаваного сигналу.

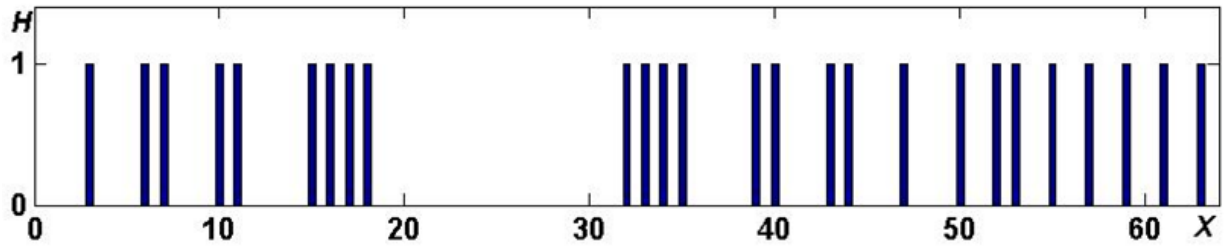


Рис. 4.2 Форма спектра – лінійна голограма завдовжки n=64

Сигнал із таким спектром формується шляхом суперпозиції гармонічних складових однакової амплітуди, частоти яких відповідають складовим спектра, зображеного на рисунку 4.2. Фазові зсуви окремих гармонік не є критичними для відновлення інформації, тому з метою підвищення якості сигналу доцільно задавати їх за псевдовипадковим законом. Такий підхід дозволяє зменшити піковий фактор сигналу та покращити умови його передавання. Часова форма сигналу, спектр якого відповідає рисунку 4.2, наведена на рисунку 4.3.

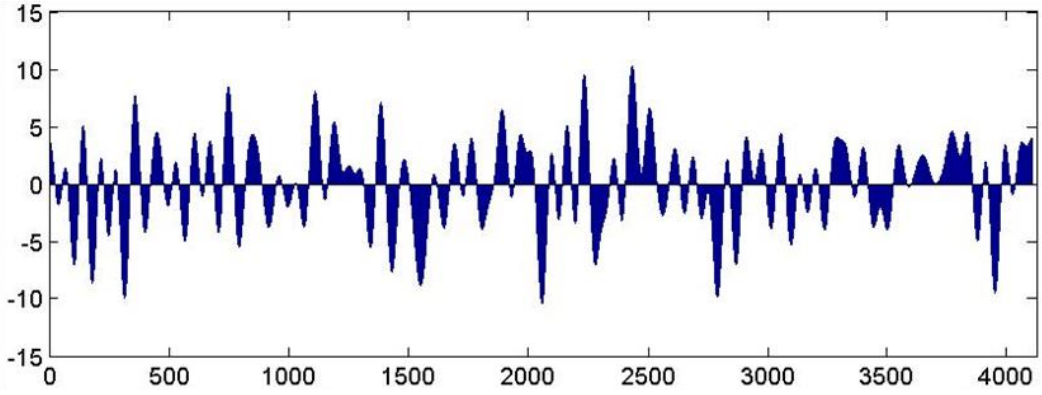


Рис. 4.3 Форма сигналу з випадковими фазами гармонік

Для того щоб аналоговий сигнал, прийнятий каналом зв’язку, після аналого-цифрового перетворення у приймачі мав неспотворений дискретний лінійчатий спектр, аналогічний зображеному на рис. 4.2, необхідно забезпечити, щоб вікно аналізу T_s (тобто тривалість фрагмента сигналу, до якого застосовується швидке перетворення Фур’є — БПФ) містило ціле число періодів усіх гармонічних складових, присутніх у сигналі.

Гармоніки, що задовольняють цю умову, є ортогональними в межах інтервалу аналізу, завдяки чому сформований сигнал належить до класу OFDM-сигналів. При цьому загальна тривалість передавання одного кодованого символу може дещо перевищувати T_s, однак фрагмент сигналу, що виділяється вікном аналізу та піддається БПФ, повинен мати строго визначену тривалість T_s.

У результаті виконання БПФ формується спектр голографічного типу, який надалі піддається процедурі відновлення голограми. Після цього утворюється одновимірний масив відновленого сигналу з чітко вираженим максимумом, номер позиції якого відповідає значенню переданого символу (рис. 4.4).

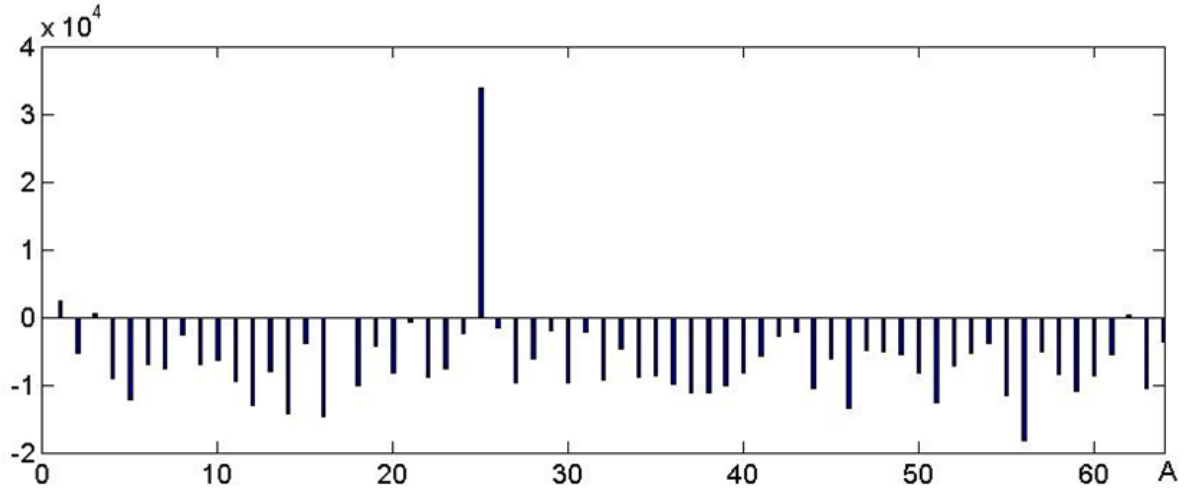


Рис. 4.4 Відновлений сигнал при n=64 значення переданого символу A=25

Голографічний код сам по собі характеризується високою завадостійкістю, однак при його застосуванні безпосередньо до спектрального представлення сигналу з’являється можливість безпомилкового приймання сигналу, потужність якого може бути на порядок меншою за потужність шуму.

Оскільки в цьому способі кодування формується аналоговий сигнал, більш інформативним показником надійності передавання стає не ймовірність

безпомилкового декодування за наявності бітових помилок у цифровому каналі, а оцінка завадостійкості відносно адитивних завад і шуму в аналоговому каналі.

У зв’язку з цим під час моделювання в середовищі MATLAB на переданий сигнал накладався білий гауссовий шум із заданим відношенням сигнал/шум (S/N) за допомогою функції awgn. Отримані результати моделювання наведено на рисунках 4.5 – 4.7, де наочно продемонстровано вплив шуму на процес приймання та відновлення сигналу.

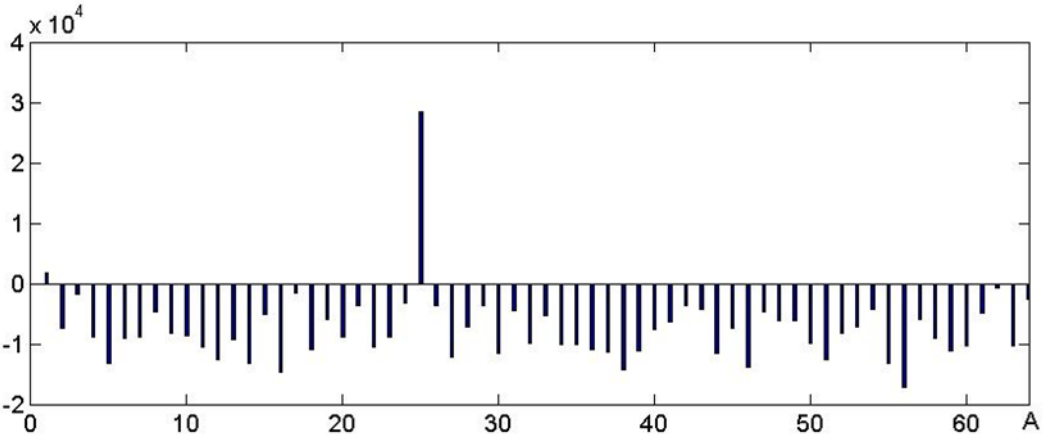


Рис. 4.5 Відновлений сигнал при S/N = 0 дБ

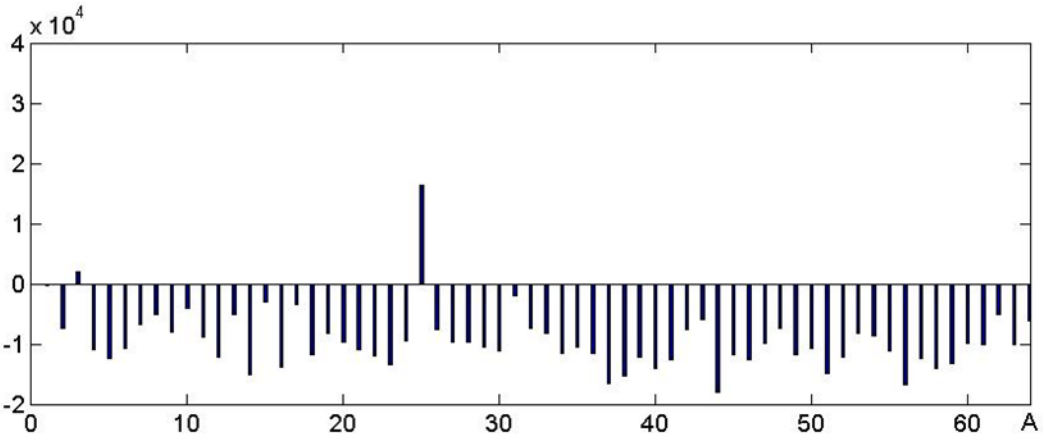


Рис. 4.6 Відновлений сигнал при S/N = -10 дБ

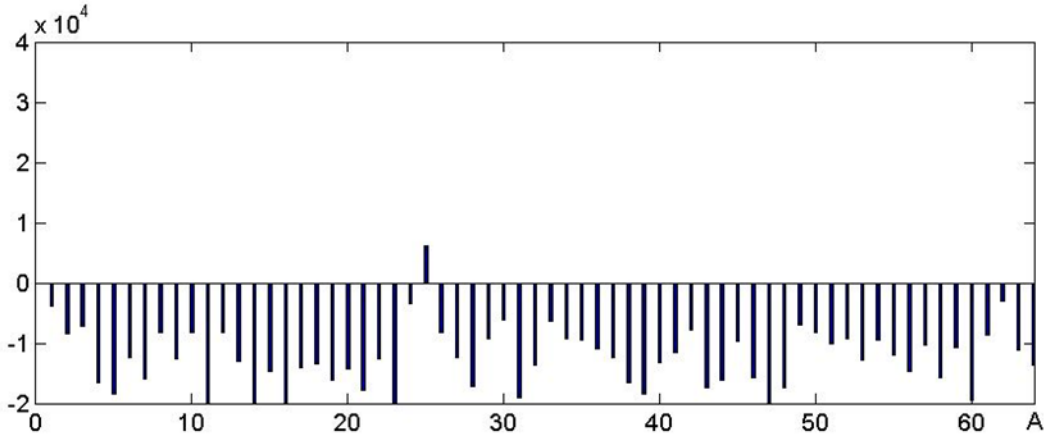


Рис. 4.7 Відновлений сигнал при S/N = -15 дБ

З наведених рисунків видно, що зі зменшенням відношення сигнал/шум на вході приймача відбувається зниження амплітуди відновленого сигналу, однак номер його позиції A = 25 визначається безпомилково. Зібрані статистичні дані свідчать про те, що навіть за відношення сигнал/шум у каналі −12 дБ імовірність безпомилкового приймання переданого символу досягає значення P = 0,9999.

У всіх системах OFDM актуальною є проблема міжсимвольної інтерференції (MCI), яка виникає внаслідок багатопроменевого поширення сигналу. Для її компенсації традиційно застосовуються захисні інтервали між символами, що, однак, призводить до зменшення спектральної ефективності. Спектральне голографічне кодування дозволяє ефективно вирішити цю проблему без використання захисних інтервалів, зберігаючи при цьому високу надійність передавання.

З метою оцінки цієї властивості було виконано моделювання впливу MCI, яка спотворює 20 % тривалості передаваного символу, за умови відсутності захисних інтервалів. На рисунку 8 наведено результат відновлення сигналу за наявності 20 % MCI без шуму, тоді як на рисунку 9 показано відновлення сигналу за тих самих умов MCI, але при відношенні сигнал/шум S/N = −10 дБ.

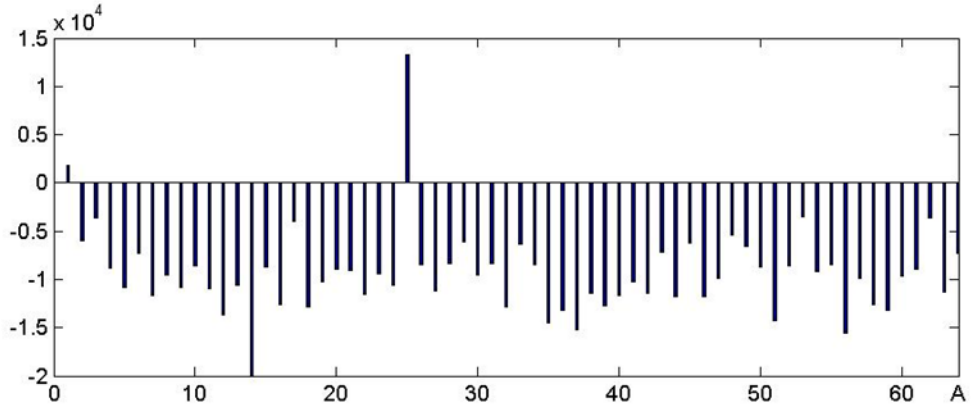


Рис. 4.8 Відновлений сигнал при MCI 20%

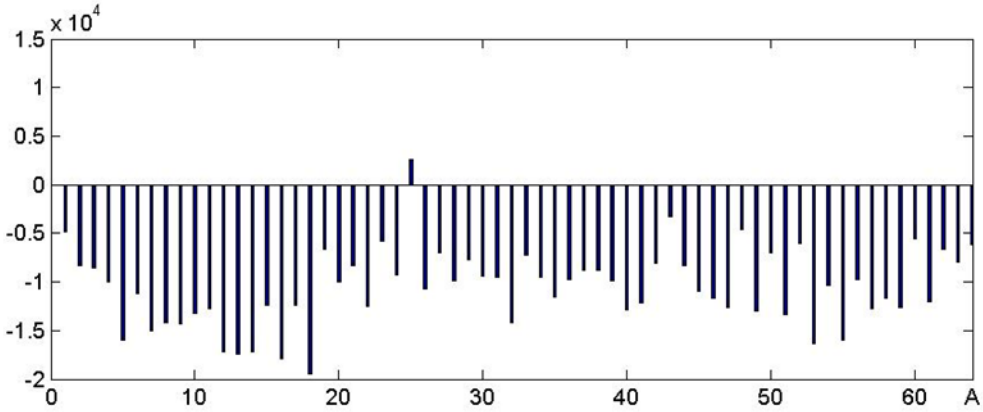


Рис. 4.9 Відновлений сигнал при MCI 20% та S/N = -10 дБ

Як видно з наведених рисунків, запас завадостійкості, який забезпечується голографічним кодуванням, дає змогу відмовитися від використання захисних інтервалів та здійснювати коректне відновлення сигналу навіть за наявності міжсимвольної інтерференції (MCI). Це, у свою чергу, дозволяє підвищити спектральну ефективність системи зв'язку, оскільки корисна частина сигналу займає більшу частку передаваного ресурсу.

Застосування OFDM-модуляції у системах зв'язку зазвичай потребує високої стабільності частоти дискретизації прийнятого сигналу в демодуляторі приймача під час виконання швидкого перетворення Фур'є. Порушення синхронізації між частотами дискретизації передавача і приймача призводить до втрати ортогональності піднесучих та спотворення спектра сигналу. Проте високий рівень завадостійкості спектрального голографічного кодування дає змогу послабити вимоги до частотної синхронізації між передавальною та приймальною сторонами.

Для оцінювання цієї можливості в ході моделювання тривалість сигналу, що надходив на приймач, була зменшена на 25 %, що еквівалентно зменшенню частоти дискретизації в демодуляторі на 25 %. У такому випадку в приймачі фіксується на 25 % менша кількість відліків сигналу, унаслідок чого сигнал втрачає ортогональність, а його спектр перестає бути чітко лінійчатим.

На рисунку 4.10 наведено результати обчислення спектра в демодуляторі приймача за номінальної частоти дискретизації (рис. 4.10а) та за частоти дискретизації, зменшеної на 25 % (рис. 4.10б), що наочно ілюструє вплив порушення синхронізації на спектральні характеристики сигналу.

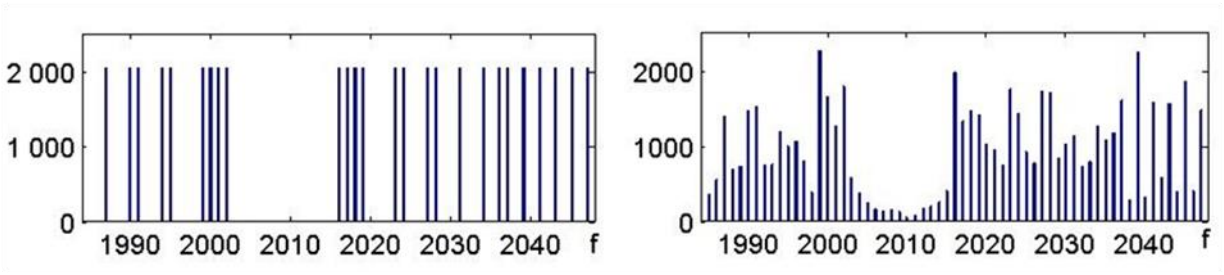


Рис. 4.10 Результат обчислення БПФ у демодуляторі: а) при заданій частоті дискретизації; б) при частоті дискретизації, меншій на 25%

Навіть за наявності такої розсинхронізації коригувальні властивості коду зберігаються, і відновлення сигналу відбувається успішно за відношення сигнал/шум S/N = −10 дБ (рис. 4.11).

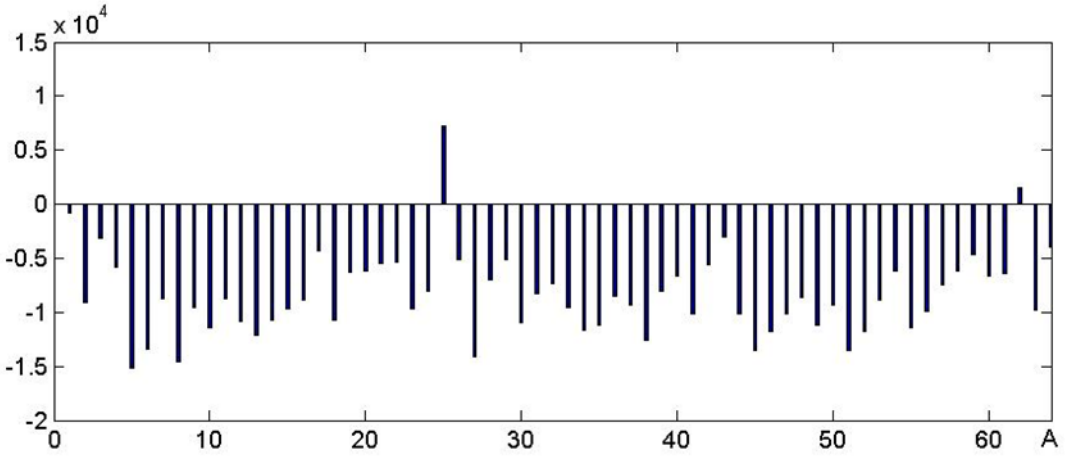


Рис. 4.11 Відновлений сигнал при розсинхронізації та S/N = -10 дБ

Отже, обидва розглянуті підходи до використання голографічного кодування — а саме завадостійке кодування в цифровому каналі та спектральне кодування в аналоговому каналі — демонструють високу ефективність з точки зору підвищення

завадостійкості безпроводового каналу зв’язку. Їх застосування дає змогу забезпечити надійне передавання інформації навіть у складних умовах, коли в каналі присутні шум і навмисні завади, потужність яких перевищує потужність корисного сигналу приблизно на 10 дБ.

Як і будь-який завадостійкий код, голографічний код ґрунтується на принципі надмірності, яка використовується для виявлення та корекції помилок, що виникають у процесі передавання. У цифровому варіанті голографічного кодування ступінь надмірності безпосередньо визначається швидкістю коду, яка задається співвідношенням $R = k / n$,

де k — кількість інформаційних бітів, а n — довжина кодового слова. Зменшення швидкості коду супроводжується зростанням коригувальної здатності, що дозволяє ефективно компенсувати значну кількість бітових помилок.

У разі спектрального голографічного кодування в аналоговому каналі надмірність реалізується іншим способом — шляхом розширення спектра сигналу. Інформація при цьому розподіляється по широкій смузі частот, що істотно знижує чутливість системи до вузькосмугових, імпульсних та навмисних завад, а також до ефектів багатопроменевого поширення.

Для реалізації, яка була використана під час моделювання, застосовувалися такі параметри:

- частотний діапазон: 936–1000 МГц;
- ширина спектра сигналу: 64 МГц;
- тривалість одного символу: 1 мкс;
- спектральна щільність швидкості передавання: 0,1 біт/Гц.

Такі параметри свідчать про орієнтацію системи не на максимальну пропускну здатність, а на підвищену надійність та завадостійкість, що є критично важливим для спеціалізованих безпроводових каналів зв’язку.

Особливу ефективність голографічне кодування демонструє у поєднанні з вейвлет-аналізом, який може використовуватися як додатковий інструмент виявлення та фільтрації завад у безпроводових каналах зв’язку. Вейвлет-перетворення дозволяє:

- аналізувати сигнал одночасно в часовій і частотній областях;
- виявляти нестаціонарні та короткочасні завади, які є типовими для безпроводового середовища;
- виконувати багатомасштабну фільтрацію шуму без істотного спотворення корисної інформації.

У випадку спектрального голографічного кодування вейвлет-аналіз може застосовуватися для попередньої обробки прийнятого сигналу, зменшуючи вплив адитивного шуму та локальних спектральних спотворень ще до виконання процедур голографічного декодування. Завдяки цьому розподілений характер інформації в голограмі зберігається, а ймовірність коректного відновлення даних додатково зростає.

Таким чином, поєднання голографічного кодування та вейвлет-аналізу формує комплексний підхід до побудови високонадійних безпроводових каналів зв’язку, здатних працювати в умовах:

- низького відношення сигнал/шум;
- інтенсивних і навмисних завад;
- порушень синхронізації та багатопроменевого поширення.

Такий підхід є перспективним для телекомунікаційних систем спеціального призначення, де першочерговими вимогами є стійкість, прихованість та гарантована доставка інформації, навіть ціною зниження спектральної ефективності.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі досліджено вейвлет-аналіз як ефективний метод виявлення та фільтрації завад у безпроводових каналах зв’язку, актуальність якого зумовлена ускладненням радіообстановки, зростанням щільності безпроводових мереж і підвищеними вимогами до надійності передавання інформації.

Показано, що класичні спектральні та статистичні методи мають обмежені можливості при аналізі нестаціонарних сигналів, імпульсних і навмисних завад. Натомість вейвлет-перетворення забезпечує одночасну локалізацію сигналу в часовій і частотній областях, що робить його особливо придатним для аналізу реальних безпроводових каналів. У роботі розглянуто дискретне та безперервне вейвлет-перетворення, особливості їх практичної реалізації та вплив вибору типу вейвлета на результати аналізу.

Доведено ефективність вейвлет-аналізу для виявлення прихованих інформаційних імпульсів на фоні гауссового шуму, коли візуальний і стандартний статистичний аналіз не дозволяють відрізнити корисний сигнал від завад. Показано, що поєднання вейвлет-фільтрації з методами когерентного накопичення та використанням псевдовипадкових сигналів суттєво підвищує завадостійкість приймального тракту.

Проаналізовано особливості сучасних безпроводових технологій і протоколів з точки зору завадостійкості та сумісності, а також обґрунтовано доцільність застосування вейвлет-аналізу як універсального інструмента моніторингу, виявлення та пригнічення завад. Окрему увагу приділено голографічному кодуванню, яке показало високу ефективність як у цифрових, так і в аналогових каналах, забезпечуючи надійне відновлення інформації навіть за дуже низького відношення сигнал/шум. Показано, що вейвлет-аналіз є ефективним доповненням до голографічного кодування, підвищуючи достовірність декодування.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що вейвлет-аналіз є потужним і перспективним інструментом для підвищення завадостійкості безпроводових каналів зв’язку, який у поєднанні з сучасними методами кодування

та розширення спектра дозволяє створювати надійні та стійкі телекомунікаційні системи. Отримані результати мають практичну цінність і можуть бути використані при проєктуванні та подальшому розвитку безпроводових систем зв’язку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way / S. Mallat. – 3rd ed. – Amsterdam : Elsevier, 2008. – 832 p.
2. Donoho D. L. De-noising by soft-thresholding // IEEE Transactions on Information Theory. – 1995. – Vol. 41, No. 3. – P. 613–627.
3. Donoho D. L., Johnstone I. M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage // Biometrika. – 1994. – Vol. 81, No. 3. – P. 425–455.
4. Percival D. B., Walden A. T. Wavelet Methods for Time Series Analysis. – Cambridge : Cambridge University Press, 2000. – 594 p.
5. Oppenheim A. V., Schafer R. W. Discrete-Time Signal Processing. – 3rd ed. – Upper Saddle River : Pearson, 2010. – 1108 p.
6. Proakis J. G., Salehi M. Digital Communications. – 5th ed. – New York : McGraw-Hill, 2008. – 1150 p.
7. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. – 2nd ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2001. – 1079 p.
8. Haykin S. Communication Systems. – 5th ed. – Hoboken : Wiley, 2009. – 928 p.
9. Goldsmith A. Wireless Communications. – Cambridge : Cambridge University Press, 2005. – 645 p.
10. Bahai A. R. S., Saltzberg B. R., Ergen M. Multi-Carrier Digital Communications: Theory and Applications of OFDM. – New York : Springer, 2004. – 376 p.
11. Klein R. W. Wavelet denoising for improved detection of OFDM signals // Security and Communication Networks. – 2010. – Vol. 3, No. 2. – P. 121–132.
12. ETSI EN 302 755. Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for DVB-T2. – ETSI, 2015.
13. ETSI EN 302 307. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for DVB-S2. – ETSI, 2014.
14. IEEE Std 802.11. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. – IEEE, чинна редакція.

15. PyWavelets. PyWavelets Documentation: Wavelet Transforms in Python Головін Ю. О. Основи теорії радіозв’язку : навч. посіб. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 212 с.
17. Філатова Г. Є. Математичні основи обробки сигналів та зображень : підручник. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – 320 с.
18. Попов А. О. Вейвлет-аналіз дискретних сигналів для довільних масштабів // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2010. – № 4. – С. 35–41.
19. Батаєв О. П. Теорія електричного зв’язку : навч. посіб. – Київ : Видавництво КНУ, 2010. – 256 с.
20. Солодка В. І. Формування та аналіз сигналів у телекомунікаційних системах // Вісник Університету «Україна». – 2020. – № 2. – С. 88–94.
21. Цифрова обробка сигналів : навч. посіб. – Одеса : ДУІКТ, 2022. – 280 с.
22. Системи та мережі цифрового радіозв’язку : навч. матеріали. – Одеса : ДУІКТ, 2021. – 198 с.
23. Цифрове оброблення сигналів : метод. вказівки до лаб. робіт. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 146 с.
24. Мішура І. В. Методи вейвлет-фільтрації шуму в телекомунікаційних сигналах : магістерська робота. – Київ, 2020. – 96 с.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ ЗАВАД У БЕЗДРОТОВИХ КАНАЛАХ ЗВ’ЯЗКУ

ВИКОНАВ:
СТУДЕНТ ГРУПИ ТСДМ-61
НІКІТА БЕРЕЗЕЦЬКИЙ

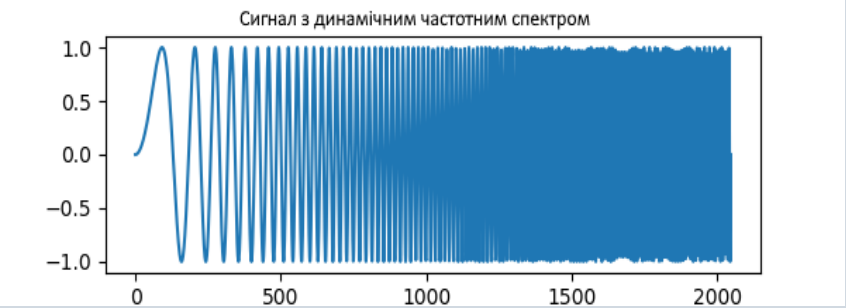
МЕТА РОБОТИ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ

- Мета роботи – дослідження можливостей вейвлет-аналізу для виявлення та фільтрації завад у безпроводових каналах зв’язку, а також оцінка його ефективності для підвищення завадостійкості та надійності передавання інформації в умовах нестаціонарної радіообстановки.
- Об’єкт дослідження – безпроводові канали зв’язку та процеси передавання сигналів у телекомунікаційних системах за наявності шумів, імпульсних і взаємних завад.
- Предмет дослідження – методи та алгоритми вейвлет-аналізу сигналів, що застосовуються для аналізу, виявлення та придушення завад у безпроводових каналах зв’язку.

Актуальність:

- Зростання кількості безпроводових мереж і обмеженість радіочастотного ресурсу призводять до ускладнення радіообстановки та підвищення рівня завад у безпроводових каналах зв’язку. Традиційні спектральні методи аналізу є малоефективними для нестаціонарних сигналів і короткочасних завад, характерних для реальних умов експлуатації. У цьому контексті актуальним є застосування вейвлет-аналізу, який забезпечує одночасну часово-частотну локалізацію сигналів та ефективне виявлення і фільтрацію завад. Використання вейвлет-аналізу дозволяє підвищити завадостійкість і надійність безпроводових телекомунікаційних систем.

Дискретне вейвлет – перетворення



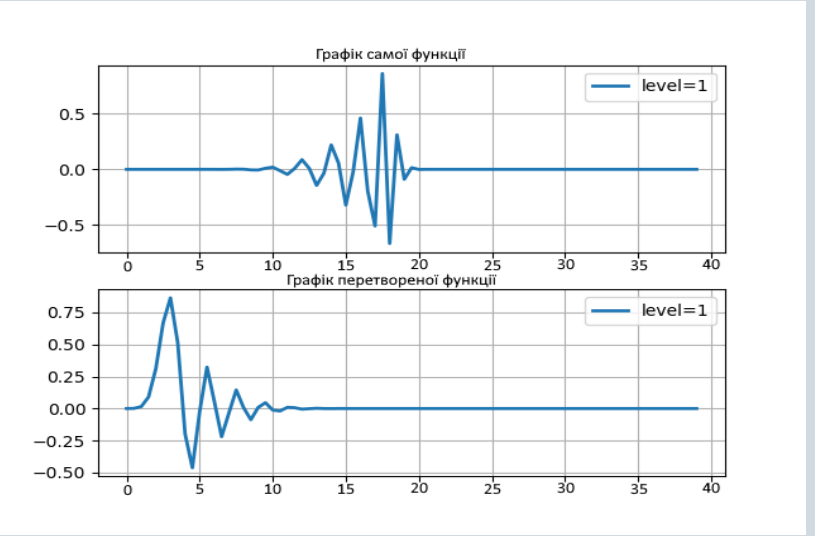
Сигнал з динамічним частотним спектром

Дискретне вейвлет-перетворення (DWT), реалізоване в бібліотеці PyWavelets, забезпечує ефективний аналіз нестаціонарних сигналів за помірної обчислювальної складності. На відміну від прямої дискретизації неперервного вейвлет-перетворення, DWT формує компактний набір інформативних коефіцієнтів, достатніх для аналізу та реконструкції сигналу, що робить його придатним для обробки великих масивів даних і роботи в реальному часі.

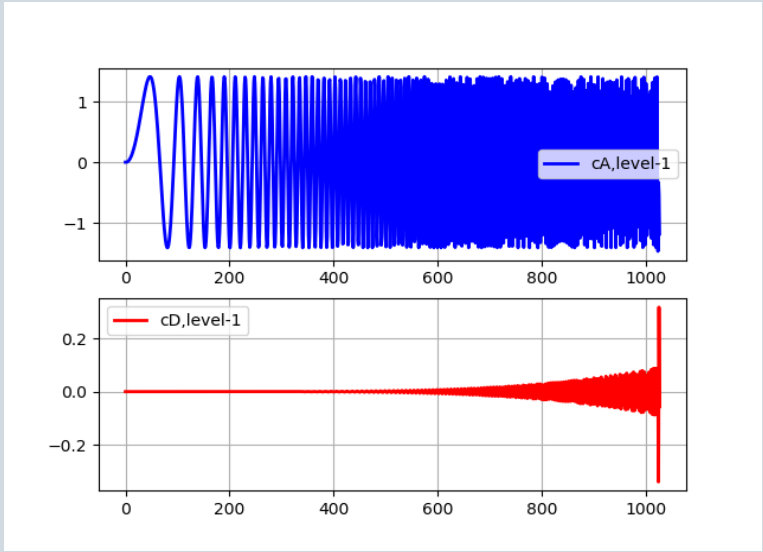
Перетворення Фур'є ефективне для стаціонарних сигналів, однак не зберігає часову локалізацію частот. Вейвлет-перетворення, навпаки, дозволяє одночасно аналізувати часові й частотні характеристики, що є критично важливим для імпульсних і динамічних процесів.

Вибір типу вейвлета залежить від характеру сигналу та вимог до точності. DWT реалізується через фільтрацію сигналу низько- та високочастотними фільтрами з утворенням апроксимуючих (cA) і деталізуючих (cD) коефіцієнтів. Для багаторівневого аналізу застосовується функція wavedec(), яка забезпечує ієрархічне представлення сигналу в різних частотних діапазонах.

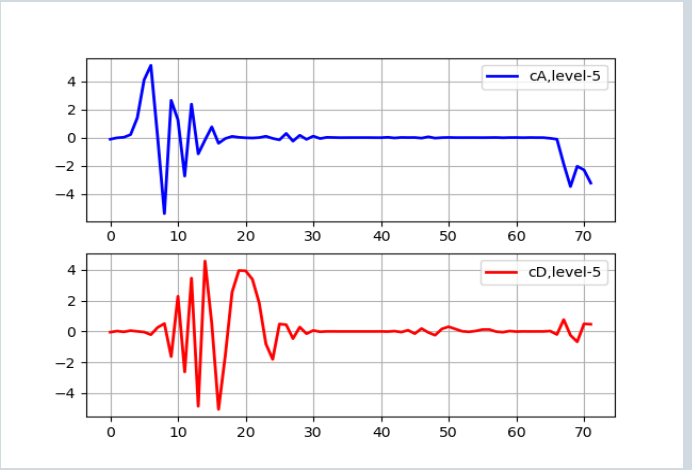
Якість результатів DWT значною мірою визначається вибором режиму розширення сигналу, що дозволяє зменшити граничні артефакти та підвищити точність аналізу.



Порівняння початкового сигналу та сигналу після вейвлет-перетворення (рівень декомпозиції level = 1), що ілюструє зміну структури сигналу та локалізацію його основних компонентм



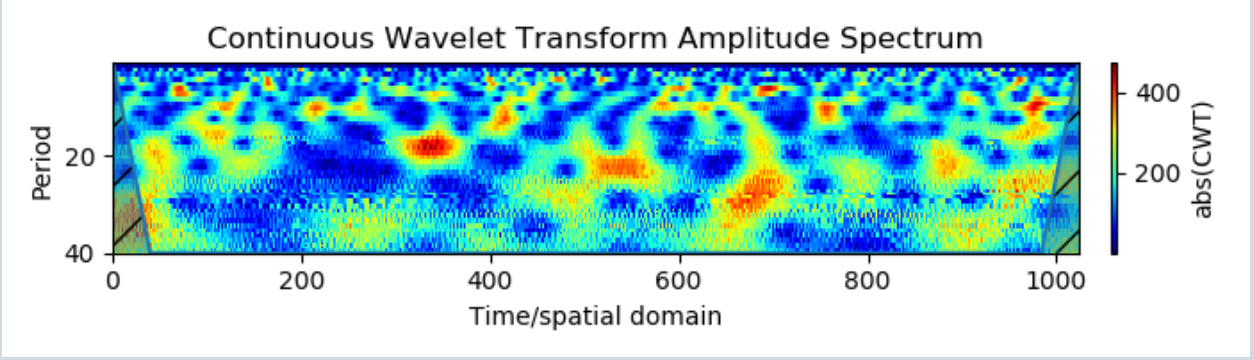
Другий рівень перетворення



П'ятий рівень перетворення

Вейвлет скалограми

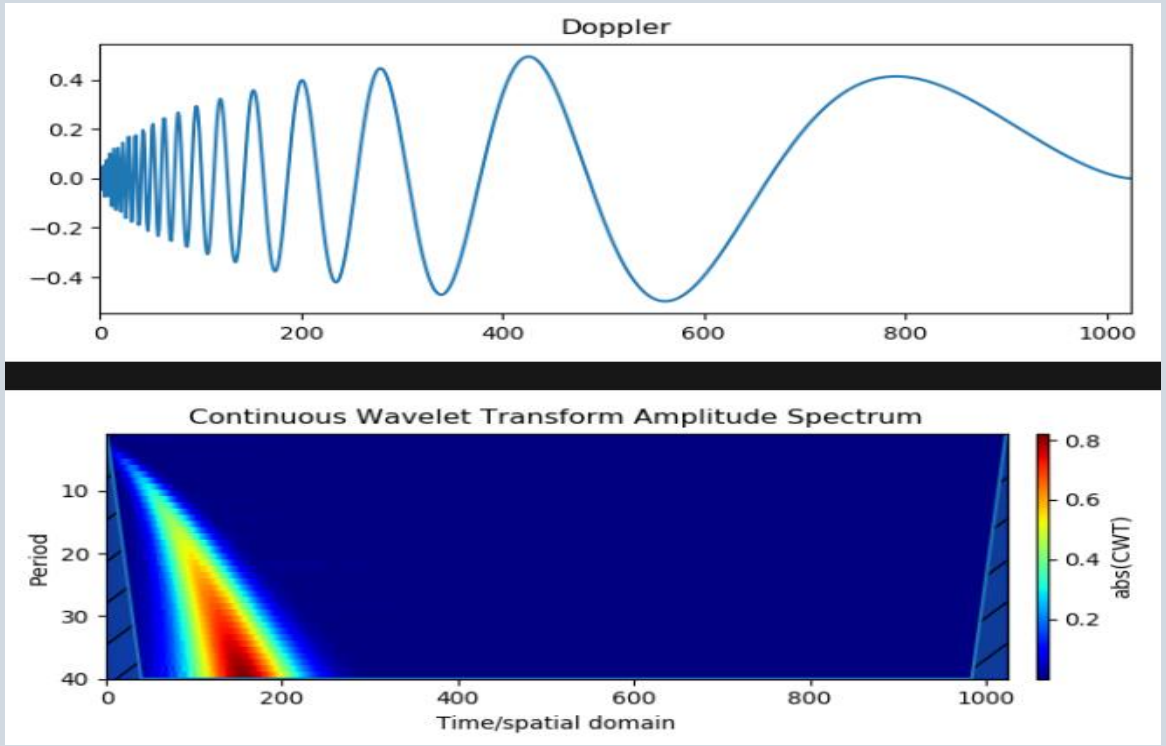
Скаллограма амплітуд безперервного вейвлет-перетворення (CWT), що відображає розподіл енергії сигналу в часі та за масштабами (періодами) і дозволяє виявити нестаціонарні частотні компоненти



На скалограмі шум зазвичай проявляється у вигляді хаотичних дрібних структур без чіткої часової або масштабної локалізації. За високого рівня шуму такі артефакти можуть імітувати корисні компоненти сигналу, тому під час аналізу експериментальних даних необхідно застосовувати порогову обробку вейвлет-коефіцієнтів і додаткову фільтрацію. Через випадкову природу шуму скаллограми можуть змінюватися при кожному запуску, що є нормальним і має враховуватися під час інтерпретації результатів.

Бібліотека PyWavelets містить набір тестових сигналів, які використовуються для дослідження властивостей вейвлет-перетворення. Їхні скаллограми наочно демонструють відображення імпульсних, гармонічних і нестаціонарних сигналів у часово-масштабному просторі та дозволяють оцінити вплив вибору вейвлета й масштабу аналізу.

Аналіз скаллограми на основі CWT дає змогу виявляти домінуючі періодичні компоненти, гармоніки та короткочасні ефекти, зокрема сезонні й святкові коливання. Це підтверджує, що вейвлет-аналіз є ефективним інструментом для дослідження складних нестаціонарних часових даних, які важко проаналізувати класичними спектральними методами.

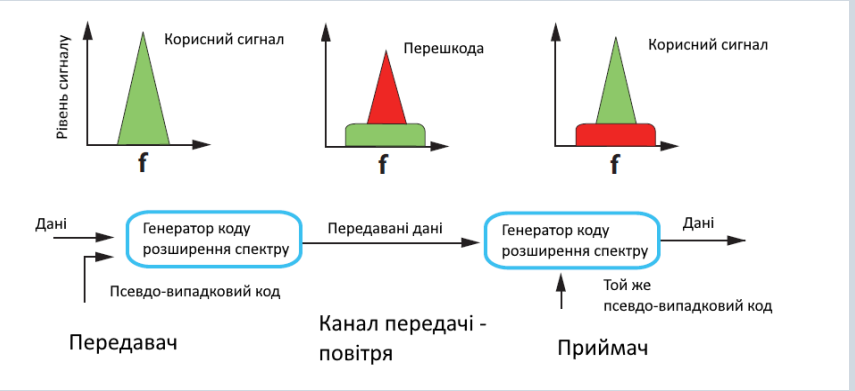


Тестовий сигнал «Doppler» та його вейвлет-скаллограма, що ілюструє зміну частотної структури сигналу в часі та ефективність безперервного вейвлет-перетворення для аналізу нестаціонарних коливань

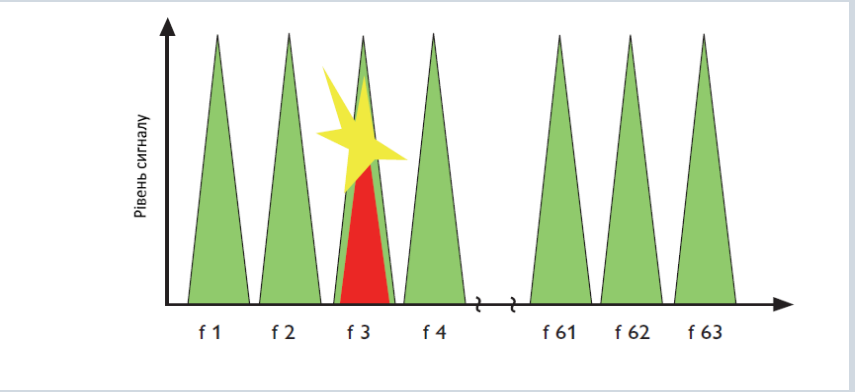
Класифікація характеристик

У промислових безпроводових мережах вирішальними є не швидкість, а надійність, завадостійкість, безпека та стабільність зв’язку. У перевантаженому діапазоні 2,4 ГГц протоколи на основі FHSS (Bluetooth, WirelessHART, Trusted Wireless 2.0) забезпечують вищу живучість і сумісність порівняно з Wi-Fi, який використовує DSSS і є чутливішим до завад. Зменшення швидкості передавання підвищує енергію на біт, що збільшує дальність і надійність зв’язку. Тому вибір промислових безпроводових технологій має ґрунтуватися на стійкості та безпеці, а не на максимальній пропускній здатності.

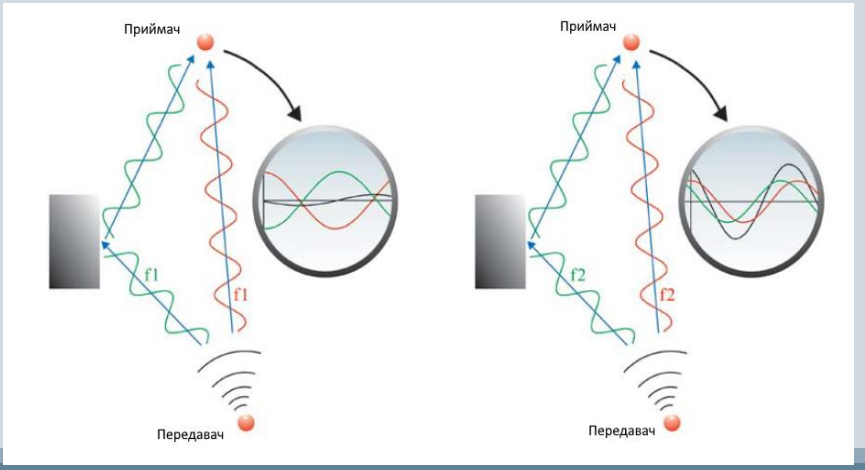
Принцип дії методу прямого розширення спектра (DSSS): формування та передавання корисного сигналу з використанням псевдовипадкового коду, його взаємодія з вузькосмуговою перешкодою в радіоканалі та відновлення корисних даних на приймальній стороні



Ілюстрація принципу FHSS: псевдовипадкове перестроювання робочої частоти між окремими вузькими каналами та локальний вплив завади, що перекриває лише один частотний піддіапазон без порушення передавання на інших частотах



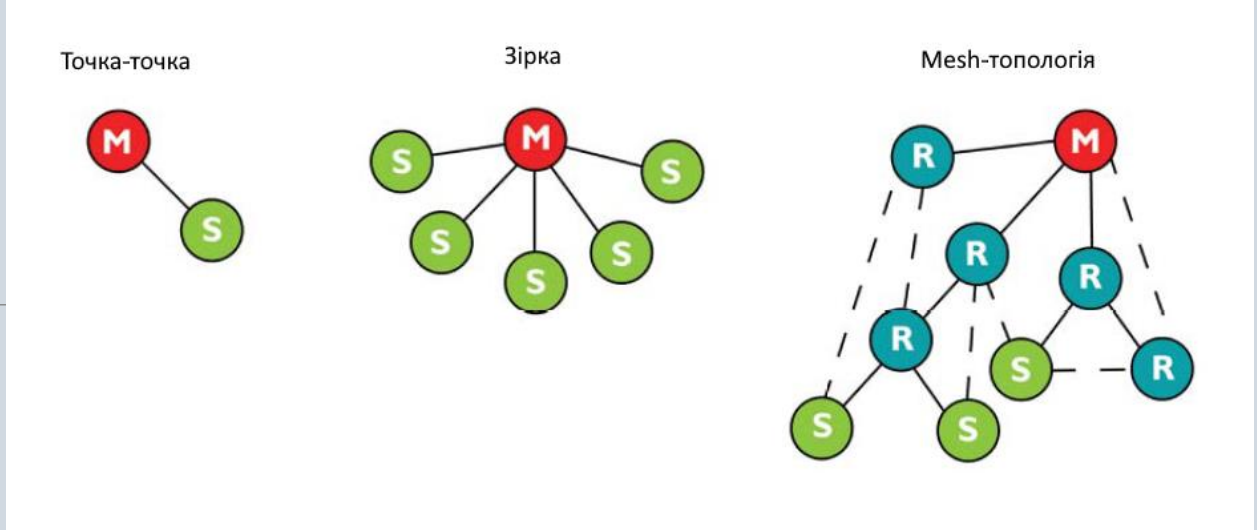
Згасання сигналу через поширення радіохвиль у вільному просторі та виникнення відображень



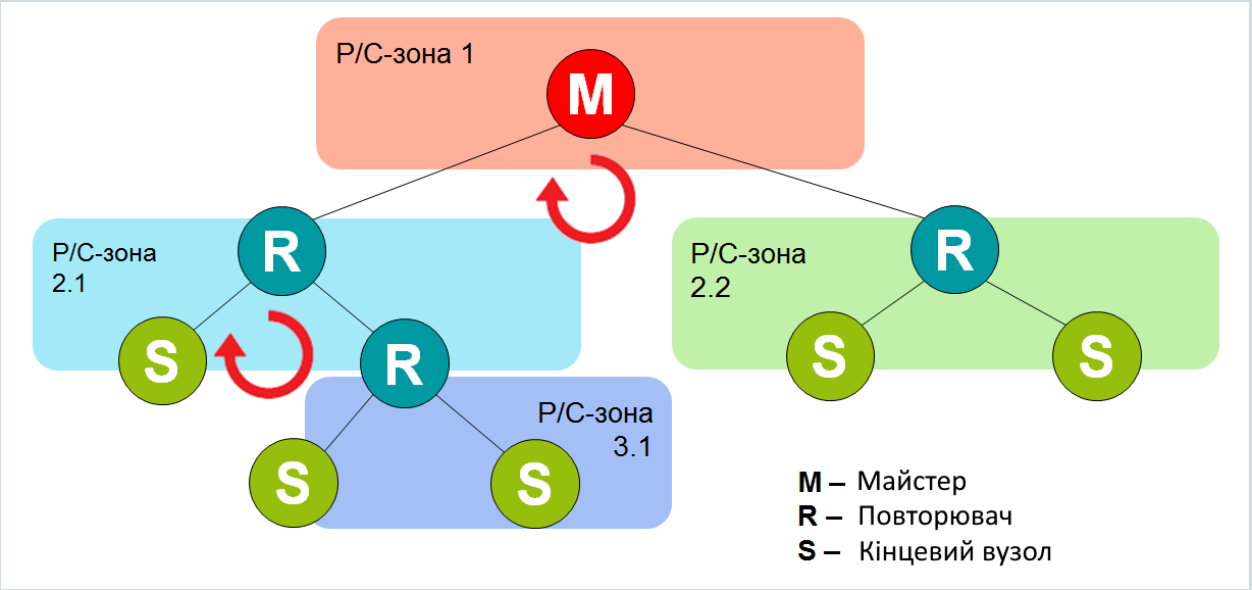
Структура мережі та характер взаємодії вузлів

Безпроводові технології суттєво відрізняються за топологіями та характером взаємодії вузлів, що впливає на масштабованість і надійність мережі. Bluetooth і Wi-Fi переважно використовують централізовані топології («зірка»), які прості в реалізації, але мають обмежену відмовостійкість через наявність центрального вузла. Натомість промислові протоколи Trusted Wireless 2.0 та WirelessHART орієнтовані на mesh-архітектури, що забезпечують резервування маршрутів, самовідновлення та стабільну роботу в складній радіообстановці.

Trusted Wireless 2.0 реалізує розподілений принцип керування з локальними зонами parent/child, що зменшує службовий трафік, прискорює підключення вузлів і підвищує живучість мережі порівняно з централізованими рішеннями. Завдяки використанню FHSS і механізмів адаптації ці технології краще підходять для промислових застосувань, де критичними є надійність, сумісність і стійкість до завад, тоді як Wi-Fi і Bluetooth ефективніші для високошвидкісного обміну даними на невеликих відстанях.

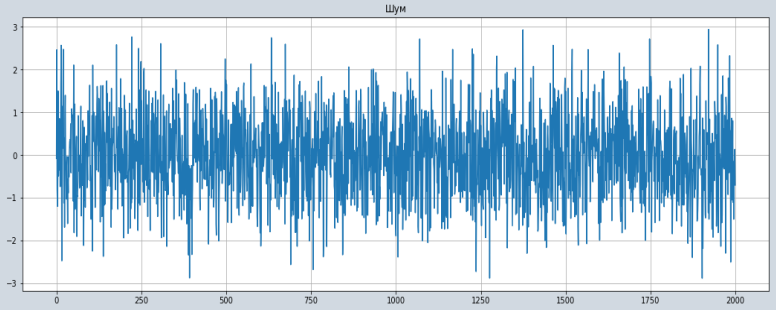


Основні топології безпроводових мереж: «точка–точка», «зірка» та mesh-топологія, що ілюструють різні способи організації зв’язків між вузлами та рівень їхньої відмовостійкості

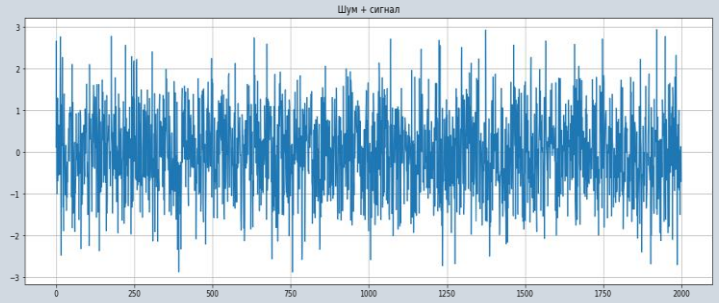


Розбиття на зони батько/спадкоємець (parent/child – P/C)

Методи кодування та декодування

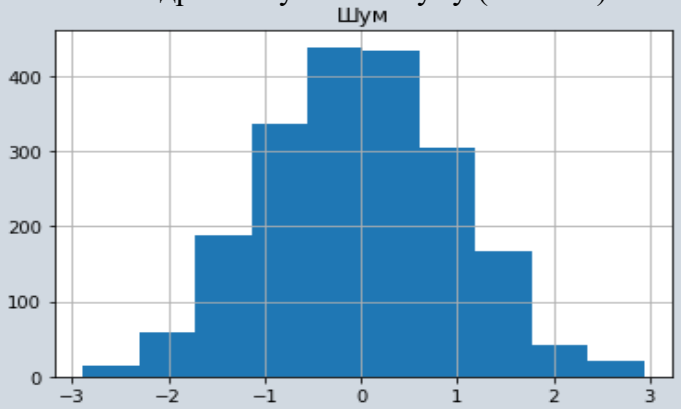


Відрізок гаусового шуму (СКЗ = 1)



Відрізок гаусового шуму з накладеним імпульсом

Чистий гауссовий шум і шум із накладеним псевдовипадковим імпульсом практично не відрізняються візуально та за класичними статистичними характеристиками, тому традиційні методи аналізу не дозволяють надійно виявити корисний сигнал. Ефективне виявлення стає можливим лише за рахунок когерентного накопичення, при якому шум взаємно компенсується, а корисна складова монотонно зростає і перевищує заданий поріг навіть за низького відношення сигнал/шум.

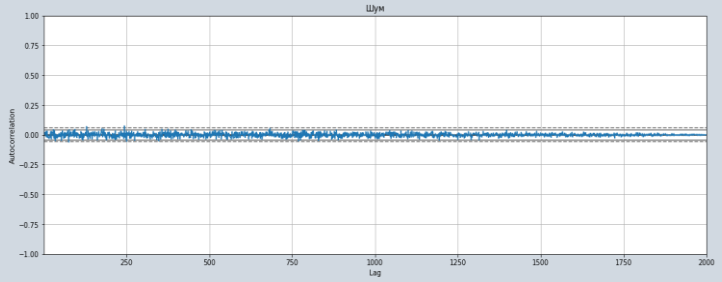


Гістограма гауссового шуму (СКЗ = 1, всього 2000 пікселів)

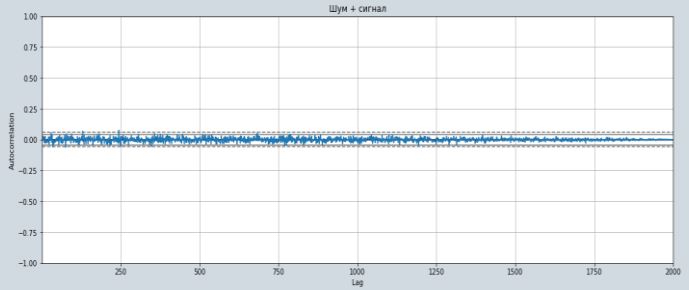


Гістограма шуму з накладеним імпульсом

Поєднання накопичення з кореляційною обробкою та вейвлет-аналізом забезпечує часово-масштабну локалізацію імпульсів і пригнічення завад. Незважаючи на вимоги до синхронізації, урахування затримок і обмеження за потужністю, такий підхід є перспективним для малопомітних і завадостійких безпроводових каналів зв’язку, де швидкість передавання не є критичною.



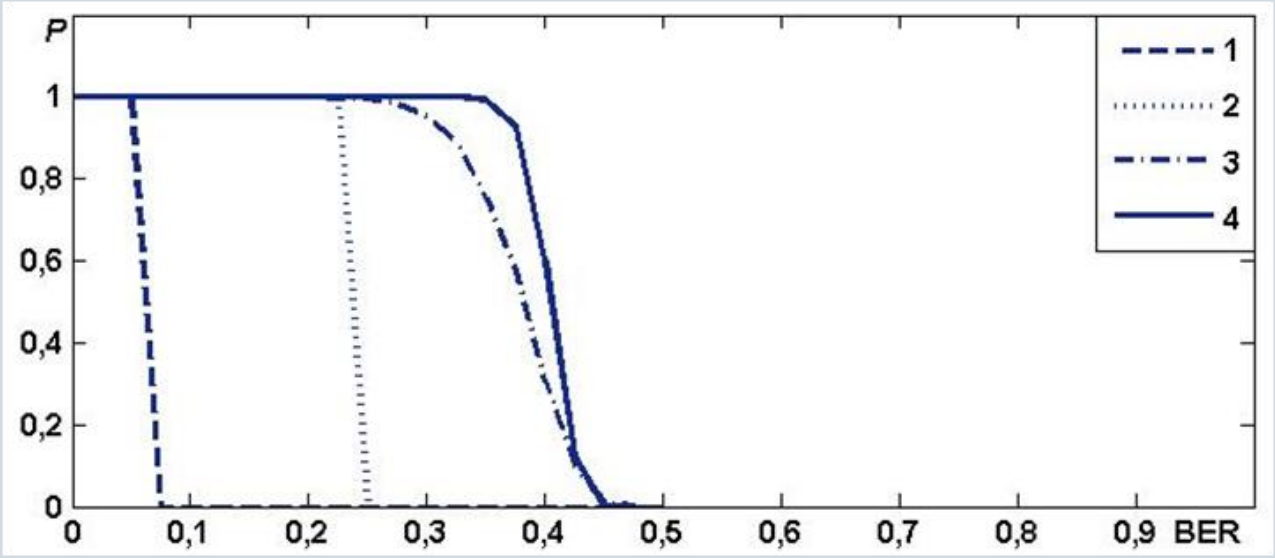
АКФ шуму



АКФ шуму з накладеним імпульсом

Використання голографічного кодування для підвищення надійності каналу зв'язку

Передавання інформації радіоканалом відбувається в умовах шумів, інтерференції та багатопроменевого поширення, що ускладнює забезпечення надійного зв’язку. Для підвищення завадостійкості застосовуються розширення спектра, FHSS, OFDM/COFDM і завадостійке кодування, однак ці методи мають обмеження. Перспективним підходом є голографічне кодування, засноване на розподіленому поданні інформації, яке забезпечує відновлення даних за значних спотворень. Поєднання голографічного кодування з вейвлет-аналізом дозволяє ефективно фільтрувати завади та підвищити надійність безпроводових каналів зв’язку.

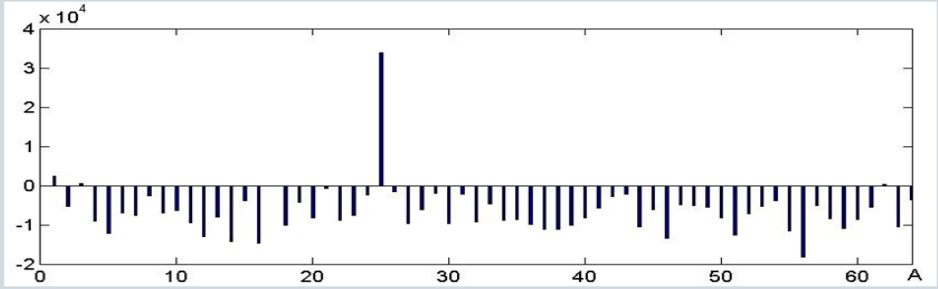


Залежність ймовірності безпомилкового декодування P від ймовірності помилки на біт BER: 1 – РС-код, 2 – РМ-код, 3 – мажоритарний код, 4 – голографічний код

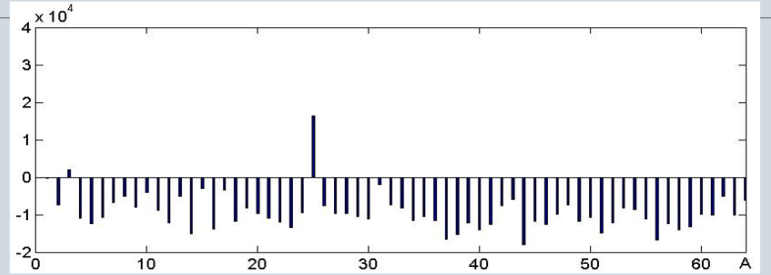
Спектральне голографічне кодування в аналоговому каналі

Спектральне голографічне кодування полягає у формуванні аналогового сигналу, спектр якого відповідає одномірній цифровій голограмі переданих даних. Сигнал синтезується як сума гармонічних складових з псевдовипадковими фазами, що зменшує піковий фактор і покращує умови передавання. За умови ортогональності гармонік сформований сигнал належить до класу OFDM.

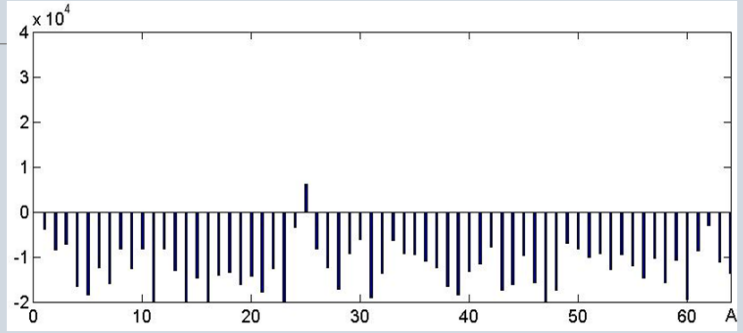
Результати моделювання показали, що голографічне кодування забезпечує коректне відновлення інформації навіть за низького відношення сигнал/шум та за наявності міжсимвольної інтерференції без використання захисних інтервалів. Поєднання голографічного кодування з вейвлет-аналізом додатково підвищує завадостійкість завдяки ефективній часово-частотній фільтрації шуму, що робить підхід перспективним для надійних безпроводових систем зв'язку.



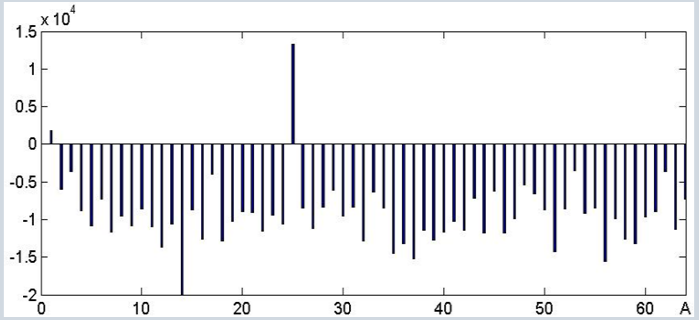
Відновлений сигнал при n=64 значення переданого символу A=25



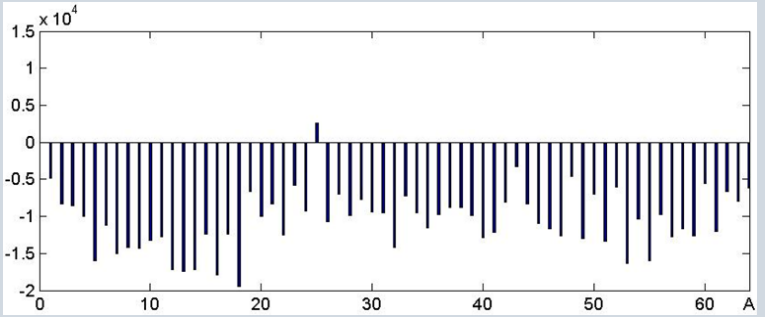
Відновлений сигнал при S/N = -10 дБ



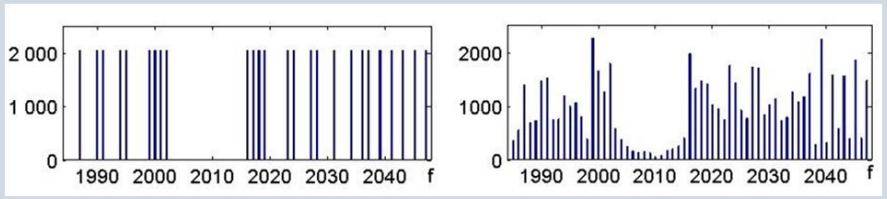
Відновлений сигнал при S/N = -15 дБ



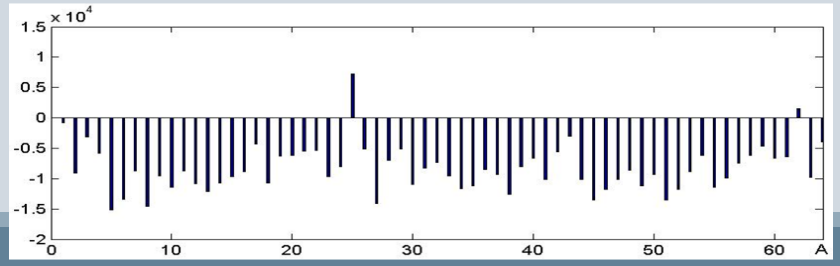
Відновлений сигнал при MCI(міжсимвольна інтерференція) 20%



Відновлений сигнал при MCI 20% та S/N = -10 дБ



Результат обчислення БПФ у демодуляторі: а) при заданій частоті дискретизації; б) при частоті дискретизації, меншій на 25%



Відновлений сигнал при розсинхронізації та S/N = -10 дБ

ВИСНОВКИ

- У кваліфікаційній роботі досліджено вейвлет-аналіз як ефективний метод виявлення та фільтрації завад у безпроводових каналах зв’язку в умовах ускладненої радіообстановки та підвищених вимог до надійності передавання інформації. Показано обмеженість класичних спектральних і статистичних методів при аналізі нестаціонарних сигналів, імпульсних і навмисних завад.
- Розглянуто дискретне та безперервне вейвлет-перетворення, особливості їх практичної реалізації та вплив вибору типу вейвлета на результати аналізу. Доведено ефективність вейвлет-аналізу для виявлення прихованих інформаційних імпульсів на фоні шуму та підвищення завадостійкості приймального тракту при поєднанні з методами когерентного накопичення й розширення спектра.
- Проаналізовано сучасні безпроводові технології з точки зору завадостійкості та сумісності. Показано доцільність використання вейвлет-аналізу як універсального інструмента моніторингу та придушення завад. Отримані результати мають практичну цінність і можуть бути використані при проєктуванні безпроводових телекомунікаційних систем.

Дякую за увагу!

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Нікіта БЕРЕЗЕЦЬКИЙ

Назва: ВЕЙВЛЕТ-АНАЛІЗ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ТА ФІЛЬТРАЦІЇ ЗАВАД У БЕЗДРОТОВИХ КАНАЛАХ ЗВ’ЯЗКУ

Координатор: Дмитро МИРОНОВ

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:0.7

Коефіцієнт подібності 2:0

Тривога: 2

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☐ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

…… ……

Дата *Підпис Наукового керівника*