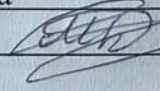


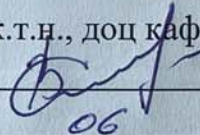
Бакалаврська дипломна робота на тему:

ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ
ЗВ'ЯЗКУ З БАГАТОЧАСТОТНИМИ СИГНАЛАМИ

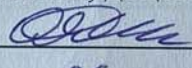
Виконав: студент 4-го курсу, групи ПЗТ-206
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

 Мельник Д.С.

Керівник: к.т.н., доц каф. ІКСТ

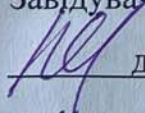
 Воловик А.Ю.
« 11 » 06 2024 р.

Рецензент: к.т.н., доцент каф. ІРТС

 Осадчук Я.О.
« 11 » 06 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.
« 11 » 06 2024 р.

Вінницький національний технічний університет
 Факультет інформаційних електронних систем
 Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
 Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
 (шифр і назва)

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
 (шифр і назва)

Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

«06» 05 2024 року

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

Мельнику Дмитру Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення швидкості передачі інформації в системах зв'язку з багаточастотними сигналами

керівник роботи Воловик Андрій Юрійович, канд. техн. наук, доцент,

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

затверджені наказом ВНТУ від «11» березня 2024 року № 80

2. Строк подання студентом роботи: 07 червня 2024 року

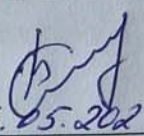
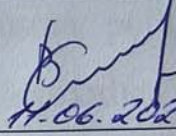
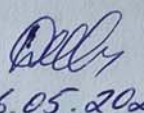
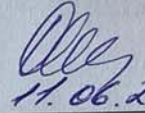
3. Вихідні дані до роботи: тип модуляції – m-QAM; режим зв'язку – дуплексний; тип мережі – багаточастотна мобільна мережа; допустимий рівень помилок (BER) – 10^{-7} ; діапазон робочих частот – 800-2800 МГц; допустима затримка сигналу – менше 20 мс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, аналіз основних технічних характеристик систем зв'язку з багаточастотними сигналами, аналіз методів підвищення швидкості передачі інформації в сучасних багаточастотних системах зв'язку, комп'ютерне моделювання параметрів багаточастотної системи зв'язку, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): система зв'язку з МІМО та адаптивною багаторівневою модуляцією; характер зміни BER у часі для фіксованого та мобільного UE при адаптивній МІМО, графіки залежностей BER від потужності завади для модуляцій M-FSK, QAM, QPSK; залежність імовірності помилкового прийому сигналу при впливі

завади на основний канал, залежність ймовірності помилкового прийому при впливі завади на додатковий канал.

6. Консультанти розділів роботи

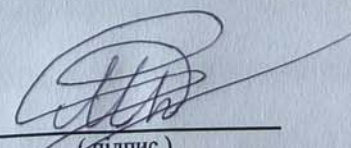
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Воловик А.Ю., Доцент кафедри ІКСТ	 06.05.2024	 11.06.2024
Охорона праці	Дембіцька С.В. проф. каф. БЖДПБ	 06.05.2024	 11.06.2024

7. Дата видачі завдання «06» травня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

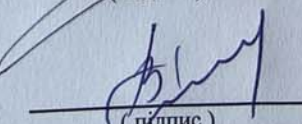
№ з/п	Назва етапів бакалаврської дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської дипломної роботи (БДР)	06.05.2024р.	
2	Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БДР	20.05.2024р.	
3	Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БДР	31.05.2024р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	04.06.2024р.	
5	Нормоконтроль БДР	05.06.2024р.	
6	Попередній захист БДР	06.06.2024р.	
7	Рецензування БДР	07.06.2024р.	
8	Захист БДР	12.06.2024р.	

Студент


(підпис)

Мельник Д.С.

Керівник роботи


(підпис)

Воловик А.Ю.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Мельник Д.С. Підвищення швидкості передачі інформації в системах зв'язку з багаточастотними сигналами – бакалаврська дипломна робота студента спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка – Вінниця: ВНТУ 2024 р. 84 стор., 40 – рис., 8 – табл., 33 – бібл. – української мовою.

Метою даної кваліфікаційної роботи є вдосконалення технологій для підвищення швидкості передачі інформації в системах зв'язку з використанням багаточастотних сигналів. Основна увага приділяється аналізу та оптимізації методів модуляції і кодування, що використовуються для забезпечення більш високої пропускної здатності і ефективного використання спектральних ресурсів.

Робота включає теоретичний огляд існуючих технологій багато частотної модуляції, таких як OFDM (ортогональне частотне мультиплексування) та їхні варіанти. Проаналізовано різні фактори, що впливають на швидкість передачі даних, включаючи інтерференцію, затримку сигналу і ефективність використання спектру. Розглядаються методи зменшення впливу шумів і спотворень на якість передачі, зокрема використання адаптивних алгоритмів та вдосконалених схем корекції помилок. Було проведено моделювання та експериментальну перевірку запропонованих методів на прикладі конкретної системи зв'язку. Отримані результати демонструють значне підвищення швидкості передачі інформації при збереженні прийняттого рівня якості сигналу.

Ключові слова: OFDM, пропускна здатність, багаточастотні сигнали

ANNOTATION

Melnyk D.S. Increasing the Information Transmission Speed in Communication Systems with Multi-Frequency Signals - Bachelor's thesis of a student of specialty 172 – Telecommunications and Radio Engineering – Vinnytsia: VNTU 2024. 84 pages, 40 figures, 8 tables, 33 references – in Ukrainian.

The aim of this qualification work is to improve technologies for increasing data transmission speed in communication systems using multicarrier signals. The main focus is on analyzing and optimizing modulation and coding methods used to ensure higher bandwidth and efficient use of spectral resources.

The work includes a theoretical review of existing multi-frequency modulation technologies, such as OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing) and its variants. Various factors affecting data transmission speed are analyzed, including interference, signal delay, and spectrum utilization efficiency. Methods to reduce the impact of noise and distortion on transmission quality are considered, particularly the use of adaptive algorithms and advanced error correction schemes. The proposed methods were modeled and experimentally tested on the example of a specific communication system. The obtained results demonstrate a significant increase in information transmission speed while maintaining an acceptable signal quality level.

Keywords: OFDM, bandwidth, multi-frequency signals

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ З БАГАТОЧАСТОТНИМИ СИГНАЛАМИ.....	12
1.1 Поняття систем зв'язку з багаточастотними сигналами.....	12
1.2 Часові та частотні характеристики багаточастотних сигналів з OFDM....	14
1.3 Принципи передавання та прийому OFDM сигналів	23
1.3.1 Смуга займаних частот і спектральні маски сигналів с OFDM	23
1.3.2 Формування сигналів з OFDM.....	24
1.3.3 Прийом сигналів з OFDM	27
1.4 Висновки до розділу	29
2 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В СУЧАСНИХ БАГАТОЧАСТОТНИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ	30
2.1 Використання методів розширення спектру багаточастотних систем зв'язку	30
2.1.1 Математичні основи розширення спектру	30
2.1.2 Розширення спектру методом прямої послідовності	32
2.2 Розширення спектру методом псевдовипадкової перебудови робочої частоти.....	34
2.3 Аналіз методів адаптації для підвищення пропускної здатності каналів багаточастотних систем зв'язку	37
2.3.1 Використання МІМО для підвищення пропускної здатності	38
2.3.2 Адаптивна модуляція в каналах МІМО	41
2.4 Висновки до розділу	45
3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БАГАТОЧАСТОТНОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ	46
3.1 Розрахунок загальної завадостійкості системи.....	46

3.2 Дослідження математичної моделі системи зв'язку	49
3.3 Висновки до розділу	58
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	59
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	59
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	62
4.2.1 Мікроклімат	62
4.2.2 Склад повітря робочої зони.....	63
4.2.3 Виробниче освітлення	63
4.2.4 Виробничий шум.....	64
4.2.5 Виробничі випромінювання.....	65
4.3 Пожежна безпека.....	66
4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі	67
4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	67
4.4 Висновки до розділу	68
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	71
Додаток А (обов'язковий). Ілюстративна частина	75
Додаток Б (обов'язковий). Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	81

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AM (Amplitude Modulation) – амплітудна модуляція.

BDPSK (Binary Differential Phase Shift Keying) – двійкова диференціальна фазова маніпуляція.

BPSK (Binary Phase-Shift Keying) – двійкова фазова маніпуляція.

DAC (Digital Analog Converter) – цифро – аналоговий перетворювач.

DFS (Dynamic Frequency Selection) – динамічний вибір частоти, технологія призначена для забезпечення максимальної продуктивності радіо каналів в областях з наявністю сильних радіо перешкод.

DL-SCH (Downlink Shared Channel) – низхідний канал розповсюдження.

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) – міжнародна некомерційна асоціація фахівців в галузі техніки, світовий лідер в області розробки стандартів з радіоелектроніки та електротехніки.

MIMO (Multiple Input – Multiple Output) – технологія багатопроменевого розповсюдження.

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) – мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів.

PSK (Phase Shift Keying) – фазова маніпуляція.

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) – різновид амплітудної модуляції сигналу

QoS (Quality of Service) – якість обслуговування.

QPSK (Quadrature Phase Shift Keying або 4-PSK) – квадратурно-фазова маніпуляція.

SNR (Signal Noise Rate) – відношення сигнал шум.

SQRT (square root raised – cosine) – корінь квадратний косинуса.

STC (Space-Time Coding) – це метод, який використовується для підвищення надійності передачі даних в бездротових системах зв'язку.

Wi-Fi (Wireless Fidelity) – висока точність бездротової передачі даних.

WLAN (Wireless Local Area Network) – бездротова локальна мережа.

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач.

АЧХ – амплітудно – частотна характеристика.

БШД – бездротовий широкосмуговий доступ.

ВДТ – відео термінал.

ВСШ – відношення сигнал\шум.

МІТРС – мікрохвильова інтегрована телерадіоінформаційна система.

ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина.

ПЛІС – програмовані логічні інтегральні схеми.

ПРЗ – пристрої радіотехніки і зв'язку.

СБСШ – системи багаточастотних широкосмугових сигналів.

СШР – системи широкосмугового радіо доступу.

ЦАП – цифро – аналоговий перетворювач.

ЦОС – цифрова обробка сигналів.

ЦПОСІ – цифрові процесори обробки сигналів.

ШЗПФ – швидке зворотне переворення Фур'є.

ШПФ – швидке перетворення Фур'є.

ВСТУП

Актуальність. Розширення обсягу цифрової інформації, що передається через мережі зв'язку, нарощує потребу у постійному вдосконаленні технологій передачі даних. Особливо значною стає швидкість передачі інформації, бо вона впливає на продуктивність, якість обслуговування та можливість запровадження нових сервісів [1].

Системи зв'язку з багаточастотними сигналами відкривають широкий спектр можливостей для підвищення швидкості передачі даних. Вони дозволяють передавати більше інформації протягом одиниці часу, адже можуть використовувати одночасно кілька частотних каналів. Це особливо важливо в контексті стрімкого росту стрімінгових сервісів, об'ємів медіа-контенту та інших високотехнологічних застосунків, які потребують швидкої передачі даних [2].

Дослідження у сфері систем зв'язку з багаточастотними сигналами спрямовані на вирішення різних аспектів оптимізації передачі даних. Це включає розробку нових алгоритмів модуляції та демодуляції, удосконалення методів обробки сигналів, оптимізацію роботи каналів передачі даних, а також створення нових пристроїв та антенних систем [3].

Крім того, дослідження у цій галузі також ставлять перед собою завдання забезпечення надійності та стійкості передачі даних, особливо в умовах різноманітних перешкод та спотворень. Це може включати розробку методів корекції помилок, адаптивних алгоритмів передачі даних та механізмів автоматичного виявлення та виправлення несправностей [1].

Отже, дослідження у галузі систем зв'язку з багаточастотними сигналами має велике значення для подальшого розвитку технологій зв'язку та забезпечення високої швидкості та якості передачі даних у сучасному інформаційному суспільстві.

Аналіз останніх досліджень показує, що було виділено декілька ключових аспектів для подальшого вивчення. По-перше, вони пропонують нові методи модуляції та демодуляції сигналів, щоб забезпечити більш ефективну передачу інформації через канали зв'язку. Також досліджується оптимізація спектру та енергоефективність, спрямована на зниження спектральної ширини сигналів та економію енергії передавачів і приймачів [2].

Крім того, активно вивчають застосування новітніх антенних технологій для підвищення швидкості та якості передачі даних. Це включає в себе розробку масивів антен, адаптивних антенних систем та інших інноваційних підходів.

Крім цього, дослідження у галузі систем множинного входу-виходу (MIMO) продовжують розвиватися, спрямовуючи зусилля на використання цієї технології для підвищення ефективності та забезпечення більшої стійкості до перешкод [4].

Загалом, останні дослідження в цій області підтверджують поступовий прогрес та показують потенціал для подальших покращень у швидкості передачі даних та продуктивності систем зв'язку з багаточастотними сигналами [1,2,3].

Метою даної кваліфікаційної роботи є вдосконалення технологій для підвищення швидкості передачі інформації в системах зв'язку з використанням багаточастотних сигналів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати *такі задачі*:

- виконати ґрунтовний теоретичний аналіз основних технічних характеристик систем зв'язку з багаточастотними сигналами;
- провести дослідження технічних аспектів передачі інформації в сучасних багаточастотних системах зв'язку;
- запропонувати покращені алгоритмічні рішення для підвищення швидкості передачі інформації в системах зв'язку з багаточастотними сигналами;
- виконати комп'ютерне моделювання запропонованих рішень.

- провести дослідження та виконати розрахунок основних параметрів охорони праці.

Об'єктом дослідження є багаточастотні системи зв'язку.

Предметом дослідження є технології, алгоритми та методи, спрямовані на оптимізацію передачі даних у системах зв'язку з використанням багаточастотних сигналів.

Новизна одержаних результатів полягає визначенні нових методів модуляції для передачі інформації, оптимізації спектру для ефективнішого використання доступного діапазону, розробку антенних систем для кращої передачі сигналів та використання технологій множинного доступу для підвищення ефективності передачі даних. Всі ці інновації сприяють покращенню продуктивності та надійності систем зв'язку з багаточастотними сигналами, розширюючи можливості для швидкого та надійного обміну інформацією.

Методи досліджень базуються на використанні теорії багатопроменевого поширення сигналів, теорії електрозв'язку та практичних рекомендацій щодо проектування та експлуатації багаточастотних телекомунікаційних систем зв'язку.

Практичне значення дослідження полягає в запровадженні нових технологій та методів, які підвищують швидкість передачі інформації в системах зв'язку з багаточастотними сигналами. Це дозволить створювати більш високошвидкісні та стабільні рішення щодо побудови сучасних телекомунікаційних систем та мереж зв'язку.

Апробація результатів роботи. Ключові концепції дослідження даної бакалаврської дипломної роботи були обговорені та висвітлені у рамках науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ у 2024 році.

Публікації результатів бакалаврської дипломної роботи. Основні положення бакалаврської дипломної роботи було опубліковано в тезах науково-технічних конференцій за профільними напрямками.

1 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ З БАГАТОЧАСТОТНИМИ СИГНАЛАМИ

1.1 Поняття систем зв'язку з багаточастотними сигналами

Широкосмугові сигнали (ШПС) використовуються у різних системах зв'язку та бездротового доступу, включаючи мобільний та стаціонарний зв'язок, супутникову навігацію, тощо. Особливість цих сигналів полягає в тому, що вони можуть передавати інформацію через різні шляхи радіохвиль і одночасно використовувати загальний частотний діапазон. Якщо взаємнокореляційні функції таких сигналів мають незначний рівень, то вони можуть передаватись в одному і тому ж діапазоні без значних перешкод [2].

Також широко використовуються багаточастотні сигнали (БЧС), де для передачі інформації використовуються частоти з різницею між ними (Δf), що обчислюється як $\Delta f = 1/T$, де T - тривалість модульованого сигналу. Особливість БЧС систем з полягає в тому, що спектри сигналів, які передаються на сусідніх частотах, суттєво перекриваються, але їх ортогональність при синхронному детектуванні не порушується [4].

Системи зв'язку з багаточастотними сигналами використовують широкий діапазон радіочастот для передачі інформації. У цих системах сигнал розбивається на різні частоти, які використовуються для передачі різних частин даних. Це сприяє передачі більшого обсягу інформації за одиницю часу та підвищує загальну пропускну здатність зв'язку. Такі системи застосовуються у різних мережах зв'язку, включаючи мобільний зв'язок, бездротовий інтернет, радіо та телевізійне мовлення, супутниковий зв'язок, тощо. Вони дозволяють передавати великі обсяги даних з високою швидкістю та забезпечують ефективний обмін інформацією між різними пристроями та мережами [5].

Такий метод передачі інформації називається ортогональним частотним ущільненням (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Технологія OFDM знаходить широке застосування в системах бездротового доступу, побудованих на обладнанні стандартів 802.11 (Wi-Fi) та 802.16 (Wi-MAX), 4G LTE та інших. Однією з переваг систем з OFDM є використання для обробки сигналів швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), що дозволяє значно спростити обладнання [4].

На рис. 1.1 представлено спектр багаточастотного сигналу в часовій та частотній області.

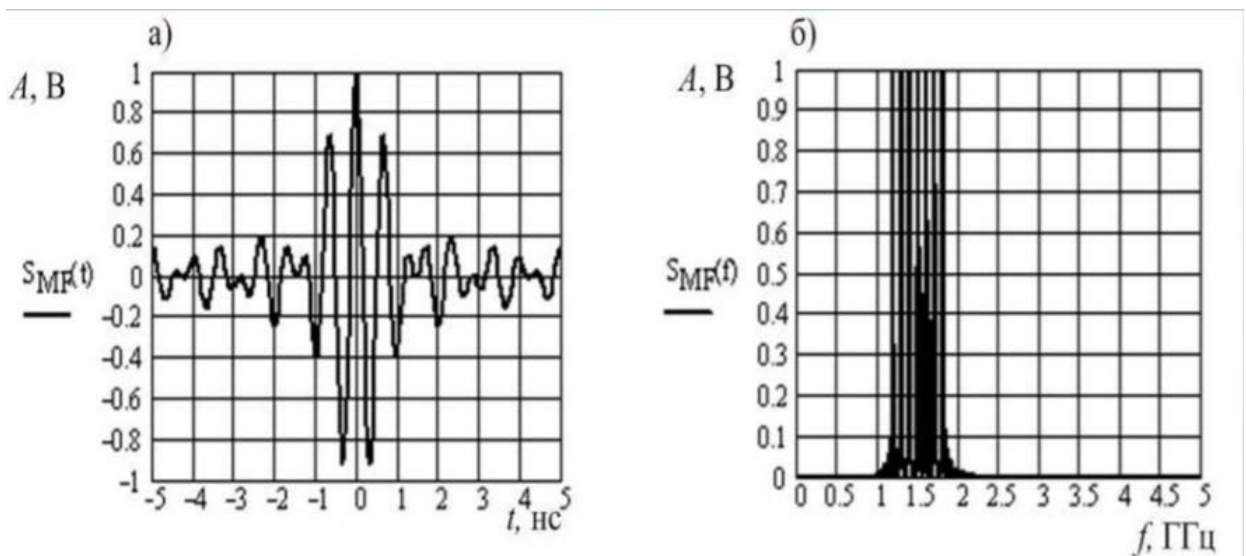


Рисунок 1.1 – Спектр багаточастотного сигналу в часовій (а) та частотній (б) області

Багаточастотні сигнали характеризуються своєрідними спектрами як у часовій, так і в частотній областях.

У часовій області, спектр багаточастотного сигналу відображає сигнал, який змінюється з часом. Він має форму, що включає різні періодичні чи неперіодичні коливання з різною амплітудою та частотою. У такому випадку, на графіку спектра в часовій області можуть спостерігатися коливання сигналу залежно від часу, що може відображати зміни сигналу протягом певного періоду [5].

У частотній області, багаточастотний сигнал може має широкий діапазон частот, який включає в себе різноманітні частотні компоненти. Зазвичай, спектр багаточастотного сигналу характеризується наявністю різних частотних складових, що можуть мати різні амплітуди і фази. На графіку спектра в частотній області можна спостерігати широкий діапазон частот, які включаються в сигнал, та їхні амплітуди, що вказують на важливі характеристики сигналу, такі як ширина смуги і енергія.

1.2 Часові та частотні характеристики багаточастотних сигналів з OFDM

Концепція передачі даних з використанням сигналів OFDM базується на методі, де потік інформації розподіляється між безліччю частотних підканалів, і передача відбувається паралельно по всім ним. Шляхом розбиття високошвидкісного потоку даних на велику кількість низькошвидкісних каналів, кожен з яких модулює свою власну підносійну, сигнали OFDM володіють високою стійкістю до завад, включаючи міжсимвольну інтерференцію [7].

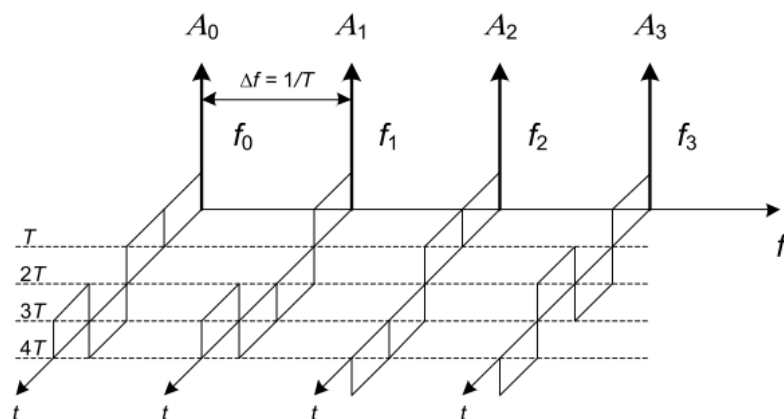


Рисунок 1.2 – Схематичне представлення сигналів з OFDM в частотній і часовій областях

Формування сигналів OFDM здійснюється за допомогою пристрою, який виконує зворотне дискретне перетворення Фур'є. Отримані цифрові відліки через цифро-аналоговий перетворювач і вихідні ланцюги передавача вводяться у безперервний канал передачі. Сигнали на піднесених частотах ортогональні.

У частотно-часовій області сигнали OFDM представлені як випадкова послідовність сигналів на кожній піднесеній частоті, а їх енергетичний спектр визначається як сума енергетичних спектрів випадкових послідовностей сигналів на кожній піднесеній частоті. Наприклад, для сигналів, які представлені на графіку, енергетичний спектр буде мати форму спектра сигналів з прямокутним імпульсом [8].

Сигнали з OFDM широко використовуються в каналах передачі, де спостерігається міжсимвольна інтерференція, викликана відображеннями сигналу від різних об'єктів. Ефективність боротьби з цією інтерференцією та ймовірність правильного прийому даних залежать від ступеня перекриття передаваних символів. Тому, для покращення якості прийому в таких умовах доцільно збільшувати тривалість символу T . Однак це може призвести до зниження швидкості передачі даних, що не завжди прийнятно.

Один з основних методів подолання міжсимвольної інтерференції, що базується на збільшенні тривалості символу T , полягає у використанні методів багатопозиційної модуляції. При цьому, тривалість символу на виході модулятора збільшується в $\log_2 M$ разів, порівняно з тривалістю T_b інформаційного символу: $T_c = T_b \log_2 M$, де M - кількість можливих елементарних сигналів (сигнальних точок). У процесі формування таких сигналів з OFDM використовуються методи фазової маніпуляції, такі як ФМ-2, ФМ-4, КАМ-16 і КАМ-64 [9].

Для подолання міжсимвольної інтерференції також використовуються захисний інтервал, пілотні сигнали і завадостійке кодування з перемежуванням. Вставляючи достатньо довгий захисний інтервал на початку кожного блоку символів, можна практично повністю усунути вплив

міжсимвольної інтерференції. Захисний інтервал є частиною часового інтервалу, призначеного для передачі блоку символів, і вставляється перед початком символу.

У OFDM сигналах застосовуються ортогональні носійні, частоти яких вибирають відповідно до умови:

$$\int_0^T \sin(2\pi f_l t) \sin(2\pi f_k t) dt = 0, \quad k \neq l, \quad (1.1)$$

де T – тривалість символу; f_l та f_k – носійні частоти каналів l та k .

Якщо виконується умова ортогональності, міжканальна інтерференція відсутня. Через більш тісне розташування підканалів за частотою, спектральна ефективність сигналів з OFDM значно перевищує спектральну ефективність класичних сигналів з частотною маніпуляцією.

На проміжку часу від 0 до T , сигнали з OFDM на носійній частоті f_n мають наступний вигляд:

$$z(t) = \operatorname{Re} \left\{ \exp(j2\pi f_n t) \sum_{n=0}^{N-1} y_n \exp(j\omega_n t) \right\} = \operatorname{Re} \{ \exp(j2\pi f_n t) s(t) \}; \quad (1.2)$$

$$\omega_n = n\omega_1 = 2\pi n \frac{1}{T}. \quad (1.3)$$

де $\omega_1 = 2\pi / T$, ω_n – n -на підносійна частота, N – кількість підносійних частот,

y_n – комплексний символ канального алфавіту, призначений для маніпуляції n -ної підносійної частоти.

Наприклад, на рис. 1.3 показана послідовність сигналів з OFDM в основній частотній смузі для $N = 1024$ підносійних частот і смузі займаних частот $F_s = 10$ МГц. Кожна частота використовує маніпуляцію ФМ-4, а

швидкість передачі даних складає 10,9 кбіт/с. У часовій області сигнал з OFDM представлений суперпозицією багатьох відрізків гармонійних коливань різної частоти, що може призвести до високого пік-фактору сигналу, як показано на рисунку [11].

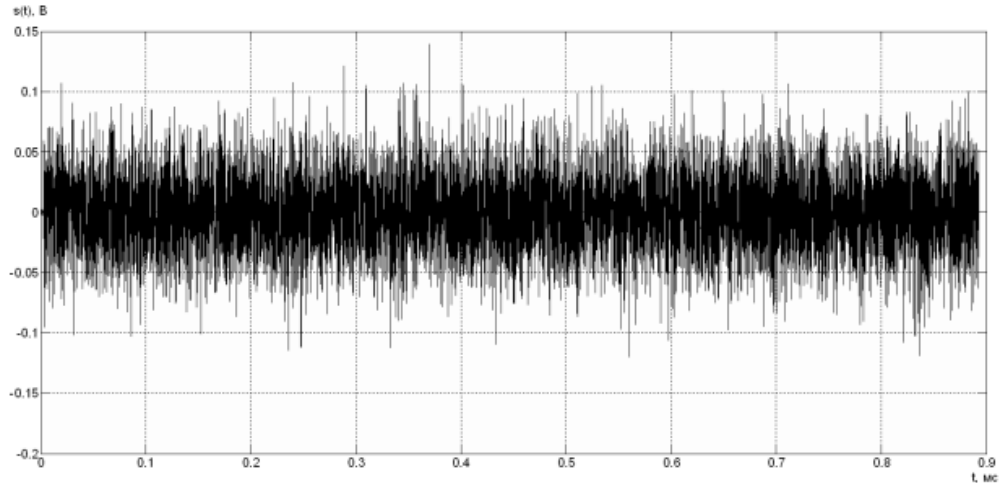


Рисунок 1.3 – Вид сигналу з OFDM для $N=1024$, $F_s=11,2$ МГц

Пік-фактор Π даних OFDM сигналів є відношенням найбільшої (пікової) потужності до середньої потужності сигналу $s(t)$:

$$\Pi = \frac{\max |s(t)|^2}{P_{cp}}, \quad P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T |s(t)|^2 dt. \quad (1.4)$$

Враховуючи умову ортогональності, для сигналу типу OFDM:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \exp(j(\omega_n - \omega_m)) dt = \begin{cases} 1, n = m \\ 0, n \neq m \end{cases} \quad (1.5)$$

звідси маємо:

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} y_n y_m^* \exp(j(\omega_n - \omega_m)t) dt = \sum_{n=0}^{N-1} |y_n|^2. \quad (1.6)$$

Миттєва потужність сигналу з OFDM складає [11]:

$$|s(t)|^2 = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} y_n y_m^* \exp(j(\omega_n - \omega_m)t), \quad t \in [0; T]. \quad (1.7)$$

Звідси можемо розрахувати значення пік-фактору використовуючи наступний вираз [10]:

$$P = \frac{\max |s(t)|^2}{P_{cp}} = \frac{\max \left\{ \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} y_n y_m^* \exp(j(\omega_n - \omega_m)t) \right\}}{\sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |y_n|^2}. \quad (1.8)$$

У ситуації, коли використовується фазова маніпуляція на підносійних частотах, потужність сигналу не змінюється в залежності від конкретних значень символів у каналному алфавіті. Для різних рівнів фазової маніпуляції, таких як амплітудно-фазова маніпуляція (АФМ) та квадратурна амплітудна маніпуляція (КАМ), при великому значенні N середня потужність сигналу залишається майже незмінною. Таким чином [10]:

$$P_{cp} = \sum_{n=0}^{N-1} |y_n|^2 = \text{const}(y_n). \quad (1.9)$$

Рис. 1.4 демонструє приклад миттєвої потужності сигналів з OFDM, де для кожної підносійної частоти застосовується двійкова фазова маніпуляція ФМ-2 при $N = 64$ носійних частот та частоті дискретизації $F_s = 11,2 \text{ МГц}$. На графіку з OFDM зображені по вертикальній осі – значення миттєвої

потужності сигналу, а час по горизонтальній. З цього графіку видно, що пік-фактор сигналу становить 7...8 дБ, порівняно з пік-фактором сигналів з однією носійною і фазовою маніпуляцією, який складає двійку. При переході до багатопозиційних амплітудно-фазових методів маніпуляції пік-фактор сигналів з OFDM збільшується [8].

При значній кількості підносійних частот і обсязі каналного алфавіту можна припустити, що пік-фактор сигналу з OFDM є випадковою величиною, що залежить від конкретного набору випадкових символів.

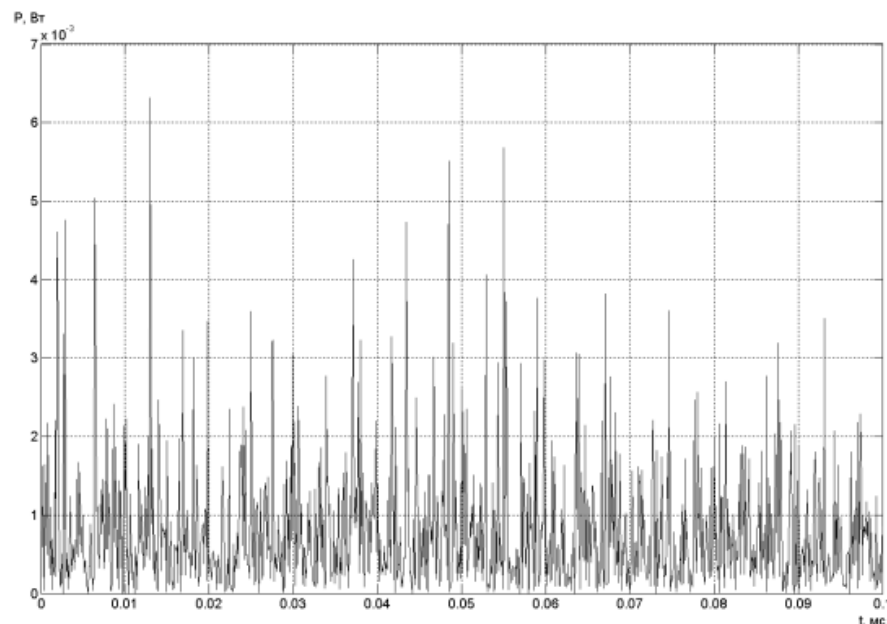


Рисунок 1.4 – Миттєва потужність сигналу з OFDM для $N = 64$

Дослідження можливостей зниження пік-фактора коливань має велике значення, оскільки саме цей параметр суттєво обмежує можливість використання сигналів з OFDM, особливо в портативних приймально-передавальних пристроях з обмеженою споживаною потужністю. Високе значення пік-фактора коливань призводить до амплітудного обмеження сигналів з OFDM у вихідних ланцюгах передавача і виникнення міжканальних перешкод, що зменшує стійкість прийому інформації та збільшує рівень позадіапазонних випромінювань [13].

Задамо спектральну щільність середньої потужності випадкової послідовності сигналів з OFDM. На інтервалі часу від $-T/2$ до $T/2$ сигнал з OFDM з комплексними амплітудами y_n може бути поданий у вигляді:

$$s(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} y_n \exp(j\omega_n t), \quad t \in -T/2; T/2, \quad \omega_n = 2\pi n \frac{1}{T}. \quad (1.10)$$

де $\omega_1 = 2\pi/T$, ω_n – n -нна підносійна частота;

N — загальна кількість частот;

y_n — комплексний символ для модуляції підносійної на n -ній частоті;

$a(t)$ — обвідна сигналу на кожній підносійній.

Розглянемо випадковий процес наступного типу:

$$\xi(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} y_{nk} \exp(j\omega_n t) a(t - kT), \quad t \in (-\infty; \infty). \quad (1.11)$$

Та його усічену k -ту реалізацію на інтервалі $t \in [0; T_A]$:

$$\xi_{T_A}^{(k)}(t) = \sum_{k=1}^{L-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} y_{nk} \exp(j\omega_n t) a(t - kT), \quad T_A = LT. \quad (1.12)$$

Позначимо спектральний характер обвідної амплітуди $a(t)$ у загальному випадку прямокутної форми як:

$$S_a(\omega) = F\{a(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t) \exp(-j\omega t) dt. \quad (1.13)$$

Звідси можемо отримати значення спектру $\xi_{T_A}^{(k)}(t)$:

$$S_{T_A}^{(k)}(\omega) = F\left\{\xi_{T_A}^{(k)}(t)\right\} = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} y_{nk} S_a(\omega - \omega_n) \exp(-j\omega kT). \quad (1.14)$$

Математичне очікування спектру $|S_{T_A}^{(k)}(\omega)|^2$ складає:

$$m\left\{|S_{T_A}^{(k)}(\omega)|^2\right\} = \sum_{n=-N/2}^{L-1} \sum_{m=-N/2}^{L-1} m\{y_{nk} y_{mr}^*\} S_a(\omega - \omega_n) S_a^*(\omega - \omega_m), \quad (1.15)$$

причому, у випадку якщо комплексні символи канального алфавіту статистично незалежні:

$$m\{y_{nk} y_{mr}^*\} = \begin{cases} 1, n = m, k = r \\ 0, n \neq m, k \neq r \end{cases} \quad (1.16)$$

$$m\left\{|S_{T_A}^{(k)}(\omega)|^2\right\} = \sum_{k=0}^{L-1} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |S_a(\omega - \omega_n)|^2 = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |S_a(\omega - \omega_n)|^2. \quad (1.17)$$

Варто зазначити, що, на відміну від випадку детермінованих сигналів, складова енергетичного спектра досліджуваних випадкових послідовностей сигналів з OFDM, обумовлена перехресними спотвореннями, дорівнює нулю. Остаточо, отримуємо:

$$G(\omega) = \lim_{LT \rightarrow \infty} \frac{1}{LT} L \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |S_a(\omega - \omega_n)|^2. \quad (1.18)$$

Звідси, спектральна щільність усередненої потужності сигналу визначається наступним виразом:

$$G(\omega) = \frac{1}{T} \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} |S_a(\omega - \omega_n)|^2. \quad (1.19)$$

Іншими словами, спектральна щільність середньої потужності OFDM сигналу є результатом сумування зміщених копій спектральних щільностей середньої потужності одночастотного сигналу:

$$G_{OFDM}(\omega) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} G(\omega - \omega_n), \quad (1.20)$$

Розглянемо приклад енергетичного спектру сигналів з OFDM у випадку, коли обвідна сигналів на кожній частоті має форму прямокутника. Звідси очевидно, що:

$$G(\omega) = A^2 T^2 \frac{\sin^2(\omega T / 2)}{(\omega T / 2)^2}, \quad (1.21)$$

де A – амплітуда обвідної сигналу, T – тривалість обвідної сигналу. Отже, отримуємо щільність спектру на рівні середньої потужності OFDM сигналу з прямокутною обвідною в квадратурних складових на кожній підносійній:

$$G_{rect}(\omega) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} A_n^2 T^2 \frac{\sin^2((\omega T - 2\pi n) / 2)}{((\omega T - 2\pi n) / 2)^2}, \quad (1.22)$$

де A_n - амплітуда n -ної підносійної, що рівна нулю у випадку якщо не використовується в сигналі з OFDM, і одиниці, якщо використовується.

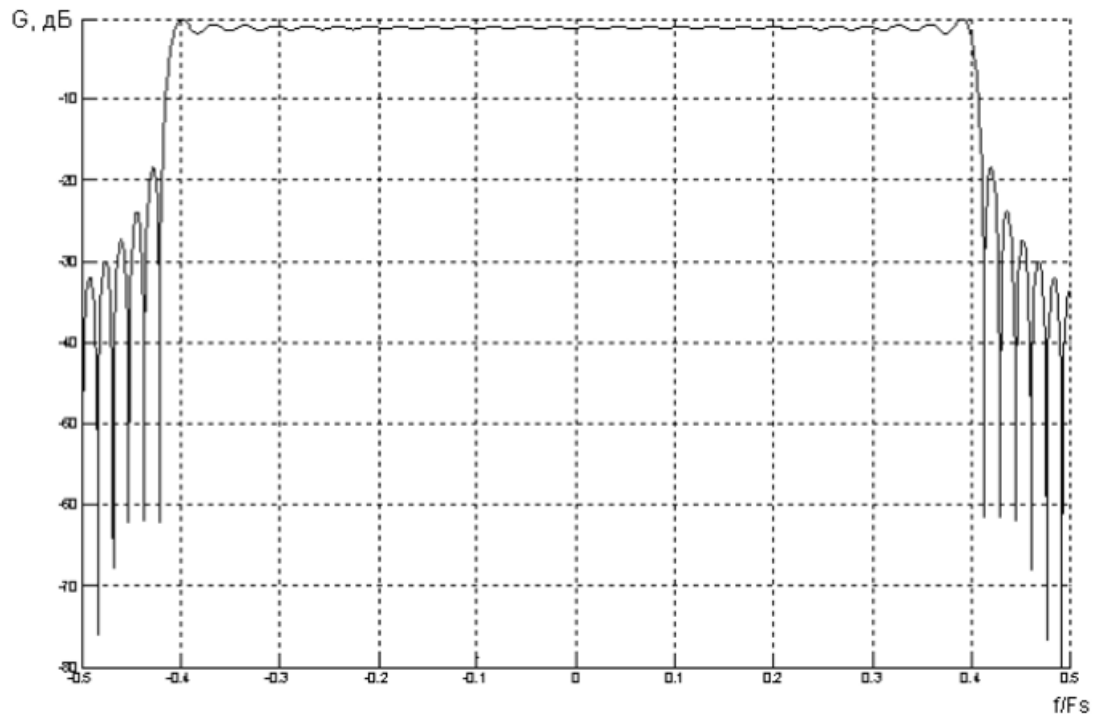


Рисунок 1.5 – Енергетичний спектр сигналу з OFDM для $N = 64$

Енергетичний спектр сигналу з OFDM з 64 підносійними, які прямокутно огибають сигнал підносійних ФМ-2 представлено на рис. 1.5. Тут по осі ординат представлено значення спектральної щільності середньої потужності сигналу, а по осі абсцис – нормована до частоти дискретизації сигналу частота. Спектр сигналу з OFDM є суперпозицією спектрів всіх підносійних [14].

1.3 Принципи передавання та прийому OFDM сигналів

1.3.1 Смуга займаних частот і спектральні маски сигналів с OFDM

Згідно з нормами УДКР, контрольна ширина смуги частот випромінювання для цивільного застосування визначається на рівні -30 дБ. До позасмугового радіовипромінювання відноситься випромінювання на частотах, прилягаючих безпосередньо до необхідної ширини смуги частот, і воно є результатом процесу модуляції, та не включає побічних

випромінювань. Норми на позасмугові випромінювання встановлені на рівнях -40, -50 і -60 дБ відносно початкового рівня 0 дБ. Розрізняють необхідну АФ і займану АФм ширину смуги частот [6].

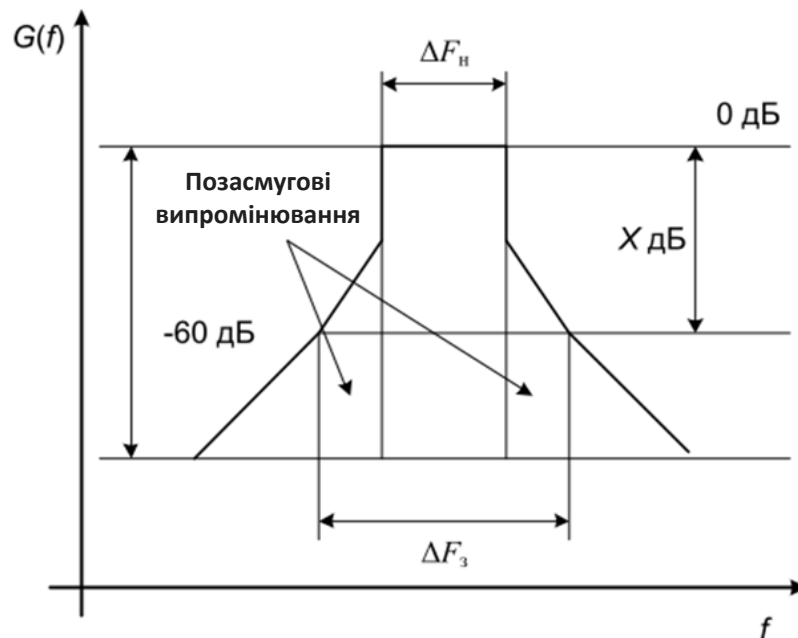


Рисунок 1.6 – Необхідна і займана смуги частот і позасмугових випромінювання радіосигналу

Займаною смугою частот зазвичай вважається та смуга, в межах якої зосереджена задана частина середньої потужності випромінюваних коливань. Для оцінки АФ вводиться поняття обмежувальної лінії позалінійного випромінювання. Це верхня межа максимально допустимих значень рівнів нелінійного спектру випромінювання, виражених в децибелах відповідно заданого рівня 0 дБ. Нижнім рівнем вимірюваної потужності випромінювання зазвичай вважають -60 дБ. При виборі форми сигналів слід прагнути, щоб АФ була найближчою до АФм [13].

Встановлення займаної смуги частот на рівні -60 дБ визначатиме також смугу частот сигналів з OFDM. Таким чином, ширина смуги частот сигналів визначається характером енергетичного спектра випадкової послідовності сигналів. Через те, що швидкість зменшення рівня нелінійних випромінювань

у таких сигналах дуже низька, займана смуга частот виявляється досить широкою.

1.3.2 Формування сигналів з OFDM

Класичні сигнали з OFDM вигідно використовують методи дискретних перетворень Фур'є для їх формування та прийому, що робить практичне втілення радіомодемів у приймально-передавальних трактах набагато простішим [14].

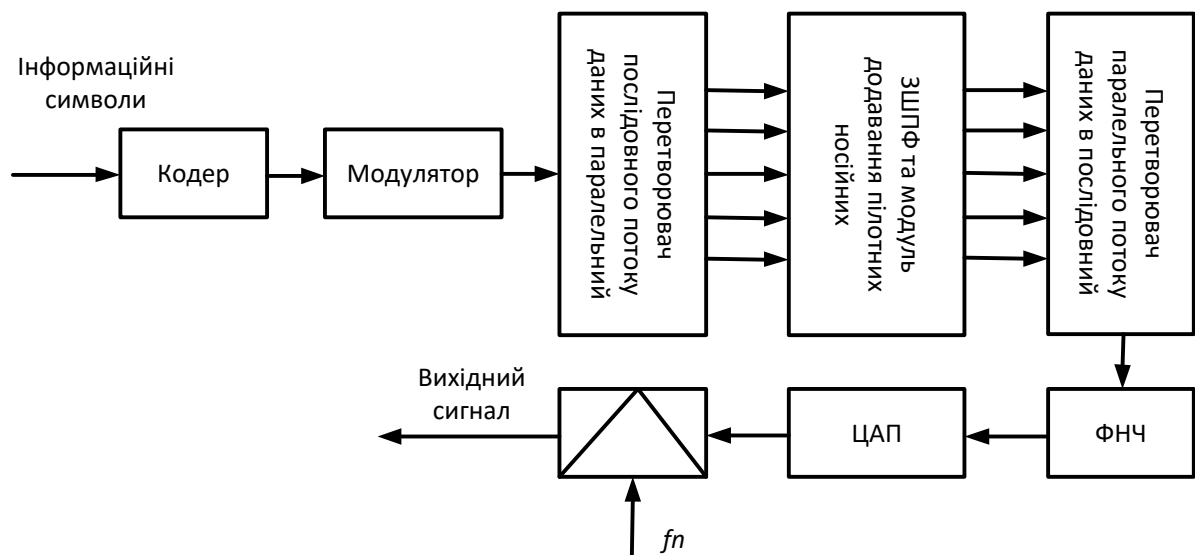


Рисунок 1.7 – Загальна структура модуля формування OFDM сигналів

Під час формування таких сигналів цифровий потік інформаційних символів спочатку проходить блок завадостійкого кодування, після чого каналні символи передаються на модулятор сигналів (рис. 1.7). Модулятор перетворює каналні символи з двійкового алфавіту в комплексні модуляційні символи відповідно до обраного методу маніпуляції. Далі, ці символи конвертуються з послідовного потоку даних у паралельний. Формування цифрового сигналу у груповому вигляді здійснюється шляхом зворотного (швидкого) дискретного перетворення Фур'є. На цьому етапі до групового

сигналу додаються пілотні піднесені частоти для оцінки параметрів каналу. Перетворення сигналу в аналогову форму виконується за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) [15].

Спектр дискретного сигналу повторюється з періодом, який відповідає частоті дискретизації F_s . Аналоговий сигнал відновлюється за допомогою цифро-аналогового перетворення (ЦАП) та низькочастотного фільтра (ФНЧ) з шириною смуги пропускання ΔF . Характеристика амплітуди та частоти ФНЧ повинна бути плоскою в області основної пелюстки спектру сигналу OFDM та швидко зменшуватися поза нею, щоб ефективно приглушити копії спектру дискретного сигналу [16].

Таблиця 1.1. – Параметри сигналу з OFDM для різних значень ΔF_s

ΔF_s , МГц	1,75	3,5	7	14	28
F_s , МГц	2	4	8	16	32
$T = N / F_s$, мкс	128	64	32	16	8

У практичних умовах обладнання для генерації сигналів з OFDM містить різноманітні компоненти, такі як блоки корекції помилок, перемеження, блоки для забезпечення тактової та циклової синхронізації, а також блоки, що впроваджують захисний інтервал тощо.

Наприклад, для реалізації обладнання для генерації сигналів з OFDM за стандартом IEEE 802.11a-2005 у режимі WirelessLAN використовуються такі параметри:

- частота дискретизації F_d та тривалість сигналу T визначаються за табл. 1.1.
- кількість точок зворотного швидкого перетворення Фур'є – $N = 256$;
- загальна кількість використовуваних частот – 200 (з них 192 припадають на інформаційні підносійні частоти та 8 – на пілотні сигнали);

1.3.3 Прийом сигналів з OFDM

Загальна структурна схема приймального пристрою для сигналів з OFDM показана на рис. 1.8. Сигнал спочатку подається на змішувач, де його частотний спектр переноситься до основної смуги. Потім через низькочастотний фільтр (ФНЧ) із відведенням ΔF сигнал перетворюється у цифрову форму за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) [15].

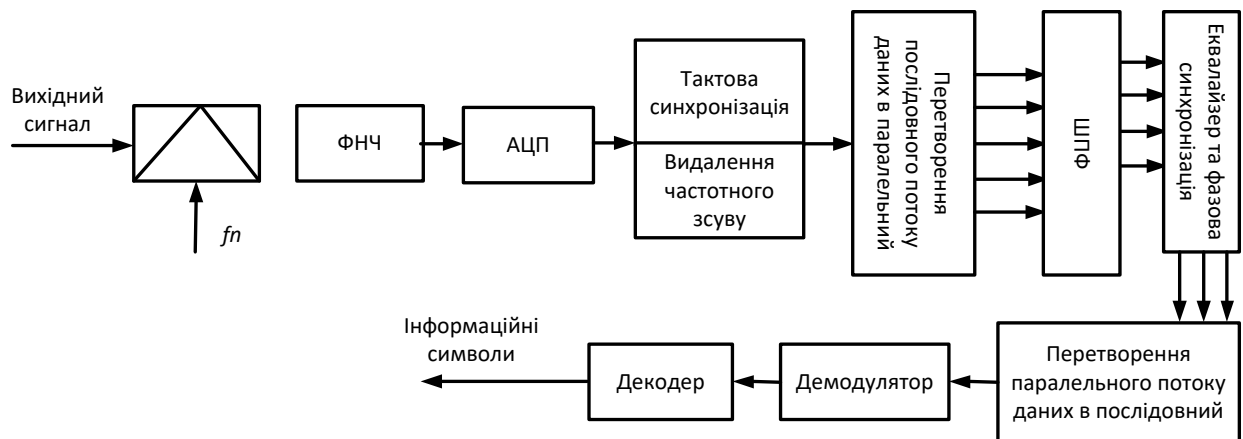


Рисунок 1.8 – Узагальнена структурна схема пристрою прийому сигналів з OFDM

У цифровій частині приймача проводяться процедури тактової і фазової синхронізації, еквалізації передавальної характеристики каналу, демодуляції та декодування. У бездротових системах передачі даних для забезпечення тактової синхронізації використовується преамбула - сигнал з OFDM з відомими параметрами і хорошими автокореляційними властивостями. Також здійснюється корекція можливого зсуву сигналу по частоті. Наявність блоку виправлення частотного зсуву обов'язкова, оскільки сигнали з OFDM чутливі до помилок неортогональності, що можуть виникнути внаслідок зміщення сигналу по частоті [12].

На рис. 1.8 показано приймач, який використовує когерентний алгоритм для прийому сигналів з OFDM. Цей алгоритм забезпечується створенням

когерентних опорних коливань на кожній підносійній всередині блоку ШПФ, подальшим множенням вхідного сигналу на ці опорні коливання та інтегруванням результатів протягом тривалості сигналу. Усі ці операції виконуються в межах блоку ШПФ, і на виході блоку отримуються результати інтегрування для кожної підносійної. Таким чином, когерентний прийом сигналів з OFDM у дискретній формі з прямокутною обвідною виконується за допомогою алгоритму ШПФ. Отримуємо [18]:

$$\hat{C}_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} x_k \exp(-j2\pi kn / N), \quad (1.23)$$

Де $x_k = \mu s_{rk} + n_k$ – тимчасові відліки сигналу на виході ЦАП, C_n – вихід суматора на n -ій піднесучій в момент часу, відповідний закінченню сигналу. Таким чином, всі дії з реалізації когерентного прийому сигналів з OFDM здійснюються в блоці ШПФ паралельно. Блок БПФ реалізує банк кореляторів, кожен з яких налаштований на певну підносійну.

Фазова синхронізація та виправлення передавальної характеристики каналу виконуються у еквалайзері за допомогою пілотних підносійних. Ці підносійні є спеціальними частотами, рівномірно розподіленими у смузі і містять передбачувану інформацію. Аналізуючи символи, які передаються та отримуються на пілотних підносійних, можна оцінити комплексний коефіцієнт передачі каналу та фазовий зсув на цих частотах, а потім вирішити завдання інтерполяції передавальної характеристики каналу у смузі займаних частот.

У демодуляторі модуляційні комплексні символи конвертуються у канальні символи. Потім, дані канальні символи проходять через декодувальний блок, захищений від перешкод код, і досягають отримувача повідомлень.

1.4 Висновки до розділу

Було проведено детальний аналіз основних технічних аспектів систем зв'язку з багаточастотними сигналами, зокрема технології OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Визначено концепцію багаточастотних систем і розглянуто їх основні характеристики, які включають в себе часові та частотні параметри сигналів OFDM.

Було розглянуто принципи передавання та прийому сигналів OFDM, включаючи процеси модуляції, демодуляції, а також синхронізації сигналів. Особливу увагу приділили смузі займаних частот і спектральним маскам, які визначають ширину каналу та роблять систему стійкою до міжсимвольних перешкод. Також, детально розглянуто процеси формування та прийому сигналів OFDM. Вивчено, процес перетворення цифрового потоку інформації в сигнал OFDM та основні етапи, що необхідно пройти від модуляції до демодуляції.

Також було описано, як фазова синхронізація та корекція передавальної характеристики каналу відбуваються за допомогою пілотних підносійних, що дозволяє ефективно відновлювати сигнал у приймачі. Отже, було отримано глибоке розуміння аспектів систем зв'язку з багаточастотними сигналами, що є важливим для їх ефективного застосування у різних сферах телекомунікацій та бездротового зв'язку.

2 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В СУЧАСНИХ БАГАТОЧАСТОТНИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Використання методів розширення спектру багаточастотних систем зв'язку

2.1.1 Математичні основи розширення спектру

Вирішення завдання забезпечення високої швидкості передачі інформації у багаточастотних системах зв'язку можна досягти за допомогою методів розширення спектру сигналу. Цей метод використовується для збільшення ширини смуги частот, що призводить до підвищення пропускну здатності каналу та збільшення швидкості передачі даних [13].

Спрощена схема типової системи зв'язку з розширенням спектру показана на рис. 2.1.

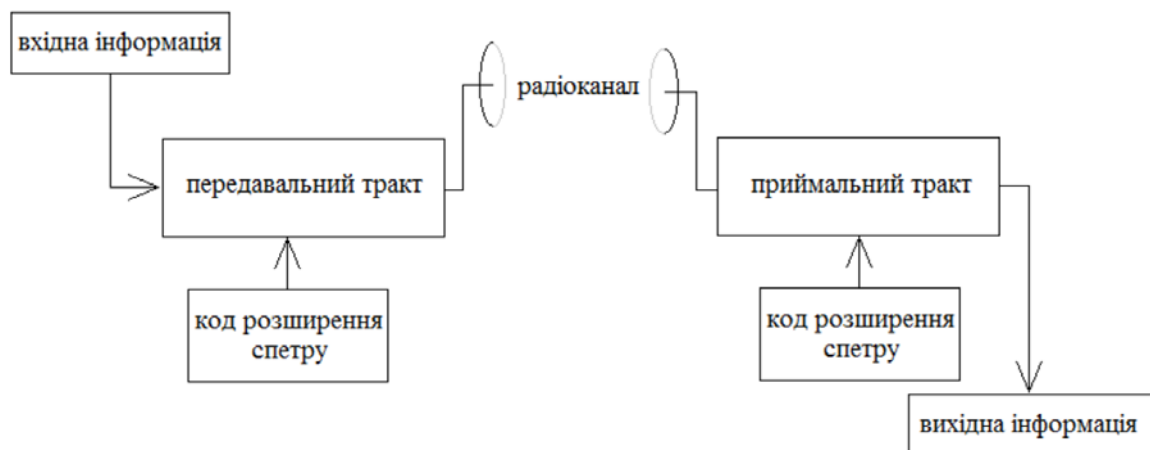


Рисунок 2.1 – Спрощена схема системи зв'язку з розширенням спектру

Під час розширення спектру корисний сигнал займає значно ширший

діапазон частот, ніж це необхідно для передачі інформації. Це досягається за допомогою спеціального коду на передавальній та приймальній сторонах, який незалежний від початкової інформації, і за його допомогою проводиться модуляція та демодуляція інформаційного сигналу.

Теоретично розширення спектру можна обґрунтувати з використанням теореми Шеннона і Хартлі про пропускну здатність каналу:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right), \quad (2.1)$$

де C – пропускна здатність каналу (біт / с), що є максимальною швидкістю передачі для теоретичної частотності (BER);

B – задана смуга пропускання каналу (Гц);

S/N – відношення сигнал/шум.

Для більш складних та реалістичних умов, коли вплив шуму перевищує сигнал, існує теорема Шеннона для каналу з шумами. Ця теорема стверджує, що можливо підвищити пропускну здатність каналу зв'язку (C), збільшуючи ширину заданої полоси пропускання (B).

Маючи на увазі низьке співвідношення сигналу до шуму в системах з розширеним спектром (при цьому теорема Шеннона допускає ситуацію, коли потужність сигналу нижча за мінімальний рівень шуму), можна зробити припущення, що [15]:

$$\frac{C}{B} \approx 1,433 \cdot \frac{S}{N}. \quad (2.2)$$

Видно, що для забезпечення мінімальної ймовірності помилок під час передачі інформації при певному співвідношенні сигналу до шуму необхідно розширити спектр сигналу, тобто збільшити ширину пропускання радіосигналу.

Як вже зазначалося, усі наявні методи розширення спектру ґрунтуються на використанні спеціального коду на передавальній та приймальній сторонах каналу зв'язку. Це призводить до розподілу інформації по ширшому діапазону частот, після чого на приймальній стороні вона знову стискається, що дозволяє відновити початкову ширину спектру. Метод розширення спектру залежить від того, яким чином цей код вводиться до каналу зв'язку [16].

2.1.2 Розширення спектру методом прямої послідовності (Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)

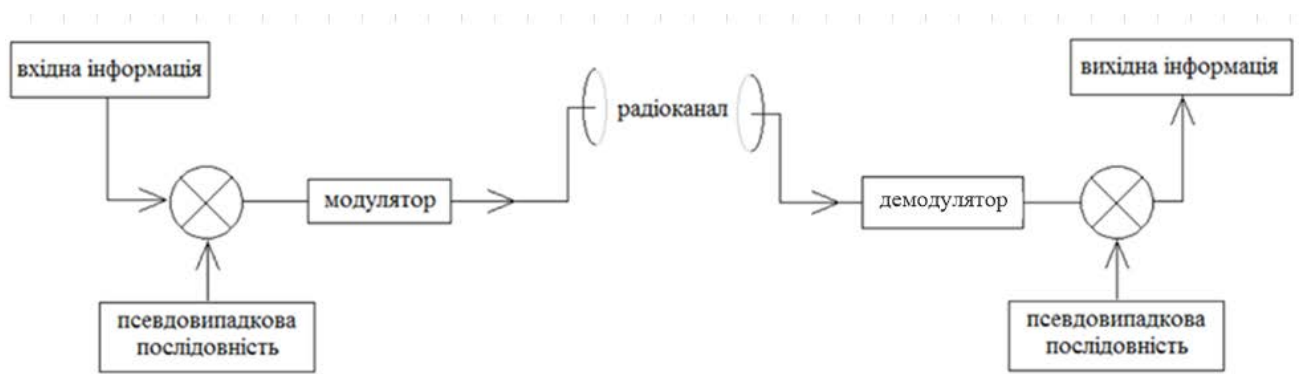


Рисунок 2.2 – Спрощена схема системи зв'язку з методом прямої послідовності

У методі розширення спектру за допомогою прямої послідовності псевдовипадкова послідовність використовується безпосередньо на передаванні інформації, ще до її модуляції. Це призводить до того, що спектр сигналу розширюється на значно ширшу частотну полосу, ніж початкова інформація, і в спектрі втрачаються чітко виділені піки. Цей процес ілюструється на рис. 2.3, де початковий сигнал позначений чорно-сірим піком, сигнал після застосування методу розширення спектру – чорним, а рівень сигналу у каналі зв'язку представлений світло-сірим.

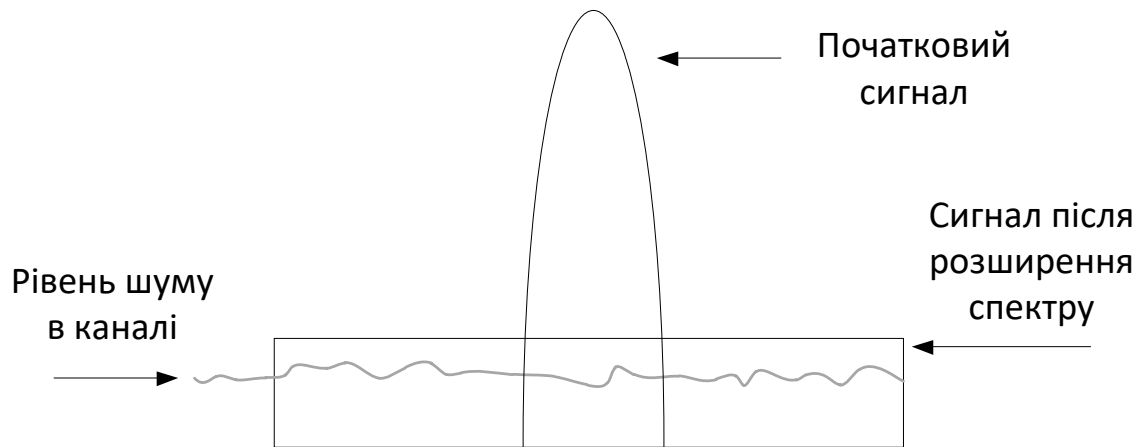


Рисунок 2.3 – Сигнал після розширення та до розширення спектру методом прямої послідовності

Як вказано вище, розширення спектру корисного сигналу в даному методі сприяє швидкому перемиканню між фазами даних. Ширина полоси пропускання сигналу (B) визначається періодом сигналу (T).

$$R = \frac{1}{T} = 2B. \quad (2.3)$$

Графічно це представлено на рис. 2.4, де початковий сигнал зображений товстою лінією, а широкосмуговий тонкою.

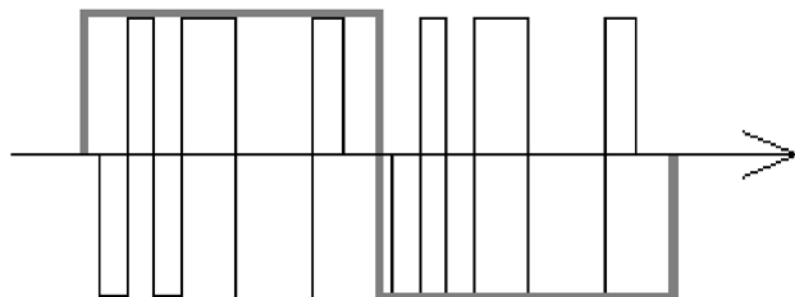


Рисунок 2.4 – Період імпульсів описаного сигналу

Особливості багаточастотних систем зв'язку з розширенням спектру методом прямої послідовності (DSSS):

- висока стійкість до вузькосмугових завад завдяки розподілу впливу завади на всій ширині спектра.
- покращена стійкість до багатопроменевого розповсюдження порівняно з традиційними системами, завдяки кореляційному прийому.
- простота організації мереж завдяки можливості багатоканальної роботи в одному частотному діапазоні.

2.2 Розширення спектру методом псевдовипадкової перебудови робочої частоти

Одним із варіантів розширення спектру є псевдовипадкова перебудова робочої частоти, яка полягає в стрибкоподібній зміні несучої частоти передавача згідно з псевдовипадковим законом в певному частотному діапазоні.

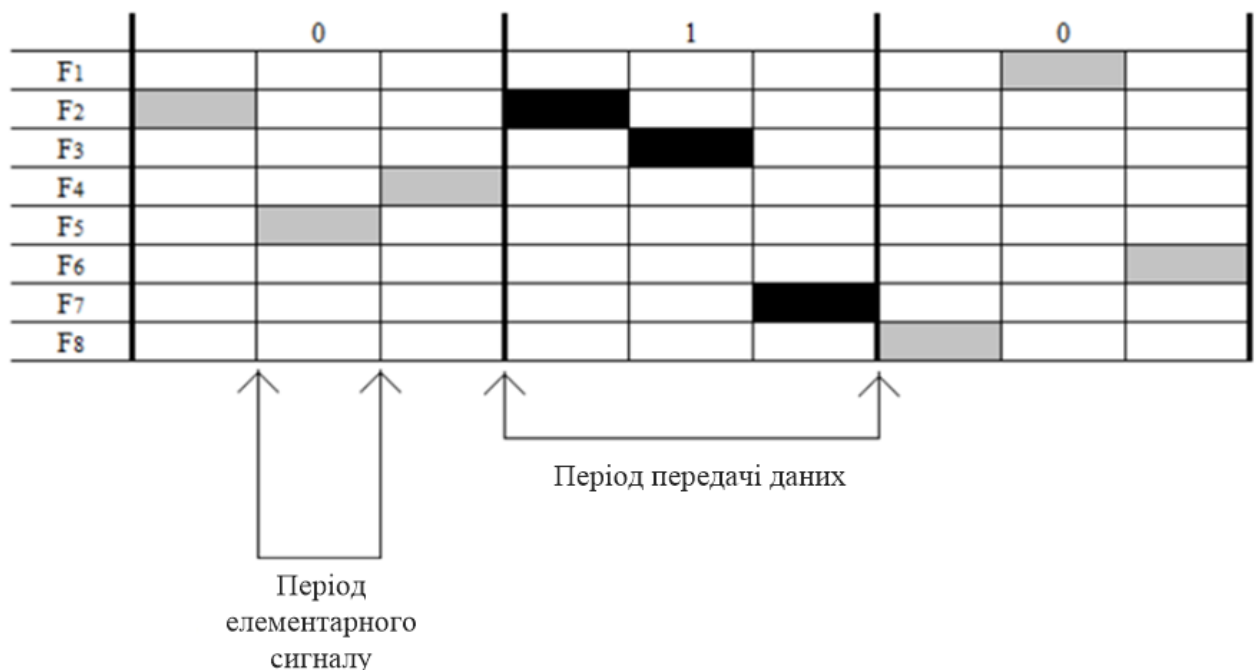


Рисунок 2.5 – Принцип швидкої перебудови робочої частоти

Ці методи поділяються на два загальних класи: швидку псевдовипадкову перебудову робочої частоти (FFH) та повільну псевдовипадкову перебудову робочої частоти (SFH). У випадку FFH несуча частота змінюється кілька разів протягом передачі одного символу, що означає, що частота зміни частотних підканалів перевищує швидкість передачі даних у каналі радіозв'язку.



Рисунок 2.6 – Принцип повільної перебудови робочої частоти

За допомогою передачі символу на різних частотах послідовно, його можна захистити від впливу вузькосмугових завад, зменшивши або уникнувши його спотворення. Більш того, швидке перехоплення робочої частоти (ШПРЧ) є більш стійким у випадку перешкод, коли вузькосмугова радіозавада "наступає" на частоту корисного сигналу, намагаючись перешкодити йому. У повільному ППРЧ зміна частоти підканалів відбувається повільніше, ніж швидкість передачі даних у каналі радіозв'язку [16].

Структура системи зв'язку, яка реалізує ППРЧ, показана на рис. 2.7.

Хоча повільна ППРЧ менш стійка до завад у порівнянні зі швидкою, виявляється значно простішою у втіленні. Обидві системи функціонують за однаковим принципом. Початкова інформація надходить до модулятора і одночасно подається на один з входів змішувача.

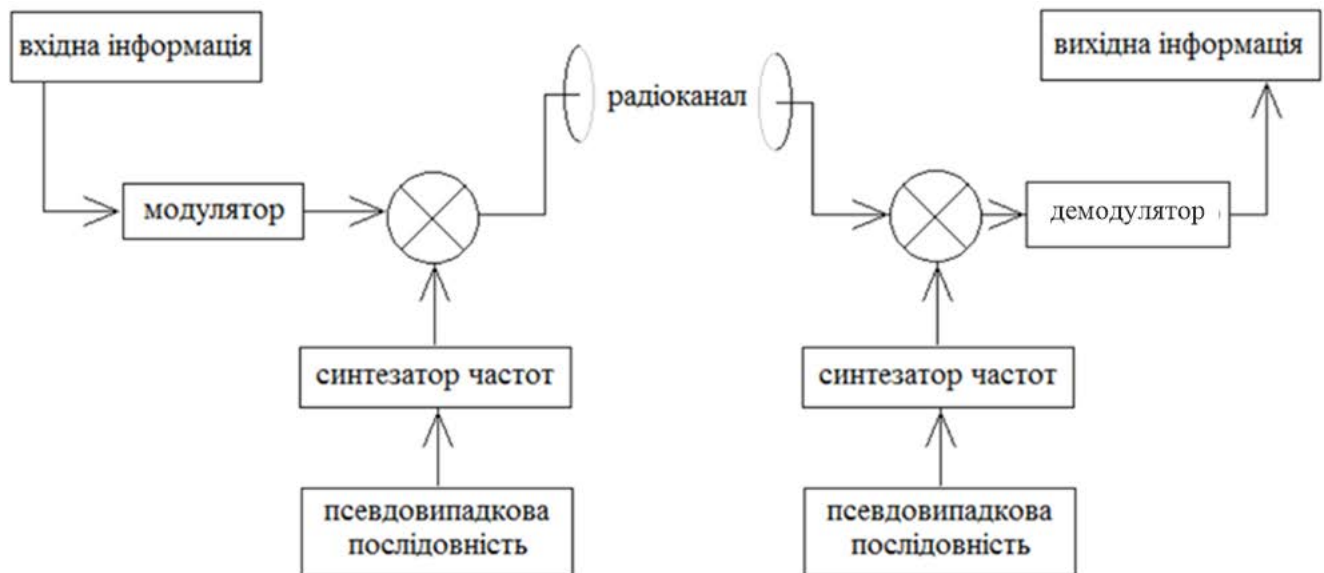


Рисунок 2.7 – Спрощена схема системи зв'язку з ППРЧ

Високочастотні коливання з синтезатора частот подаються на другий вхід змішувача. Після проходження змішувача ми отримуємо радіосигнал зі стрибкоподібною зміною частоти, а послідовність цих частот формується генератором псевдовипадкової послідовності. На приймальному кінці процес відбувається у зворотному напрямку для отримання інформаційного сигналу. Важливо відзначити, що псевдовипадкова послідовність має бути однаковою як на передавальному, так і на приймальному кінцях. Метод ППРЧ можна математично описати так:

- вихідний сигнал після розширення спектру:

$$s(t) = b(t) \cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + \varphi_0], \quad (2.4)$$

де $b(t)$ – сигнал, на виході модулятора; $\cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + \varphi_0]$ – це сигнал випадкової перебудови частоти, що отриманий після синтезатора;

$\Delta\omega = 2\pi / T$ – відстань між частотами сформованими синтезатором;

φ_0 – початкова фаза.

Сигнал, отриманий після проходження через радіоканал, можна представити

наступним чином:

$$y(t) = s(t) + n(t) + J(t), \quad (2.5)$$

$s(t)$ - сигнал, що передається (з розширеним спектром);

$n(t)$ - шуми та завади у каналі; $J(t)$ - інтерференція в каналі.

Для отримання кінцевого сигналу, вхідний сигнал множиться на вихідний сигнал синтезатора частот. Математично це можна представити таким чином:

$$\begin{aligned} b'(t) &= y(t) \cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + \varphi_0] = \\ &= \frac{1}{2}b(t) + \frac{1}{2}b(t) \cos[2(\omega_0 + n\Delta\omega)t + 2\varphi_0] + [n(t) + J(t)] \cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + \varphi_0]. \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.3 Аналіз методів адаптації для підвищення пропускної здатності каналів багаточастотних систем зв'язку

Використання технологій OFDM і MIMO разом з багатопозиційною модуляцією та канальним кодуванням дозволяє досягти високої спектральної ефективності в мобільних системах зв'язку, але потребує адаптації до змін у каналі. Для цього використовуються механізми якості каналу (CQI) та HARQ. У системі з OFDMA кожному користувачеві виділяється блок підносійних частот, залежно від SNR адаптивно вибирається модуляція і швидкість кодування.

Основна ідея адаптації полягає в тому, щоб вибирати методи модуляції та швидкості кодування відповідно до стану каналу: використовувати вищі швидкості для передачі даних у хороших умовах та нижчі – у поганих, щоб уникнути втрат пакетів. В нових поколіннях мобільних широкосмугових систем зв'язку підтримуються різні види модуляції – від BPSK до 256QAM, та різні методи кодування, такі як згорткове, турбо-кодування зі змінною

швидкістю, блокове турбо-кодування та кодування LDPC. Загалом, існує більше п'ятдесяти різних конфігурацій, але лише деякі з них застосовуються у практиці. Ці конфігурації, відомі як профілі пакету, формуються на основі оптимального поєднання методів модуляції, кодування та швидкостей кодування, а також кількості повторних запитів [13].

2.3.1 Використання MIMO для підвищення пропускної здатності

Пропускна здатність є однією з ключових характеристик якості зв'язку, а наближення її до межі Шеннона вважається важливим в плані оцінки ефективності сучасних та майбутніх мобільних систем. Таким чином, однією з мет адаптації є максимальне наближення до цієї межі. Згідно з формулою Шеннона, специфічна пропускна здатність (іноді називана продуктивністю або спектральною ефективністю) SISO-системи з одним просторовим каналом складає [15]:

$$C = \log_2(1 + \rho), \rho = \frac{E_b}{N_0} \quad (2.7)$$

$$\text{де } \rho = \frac{E_b}{N_0};$$

E_b – енергія імпульсу одного біту інформації;

N_0 – густина спектральної потужності шуму.

Використання технології MIMO для просторового розподілу сигналу (рис. 2.1) має потенціал збільшення пропускної здатності системи.

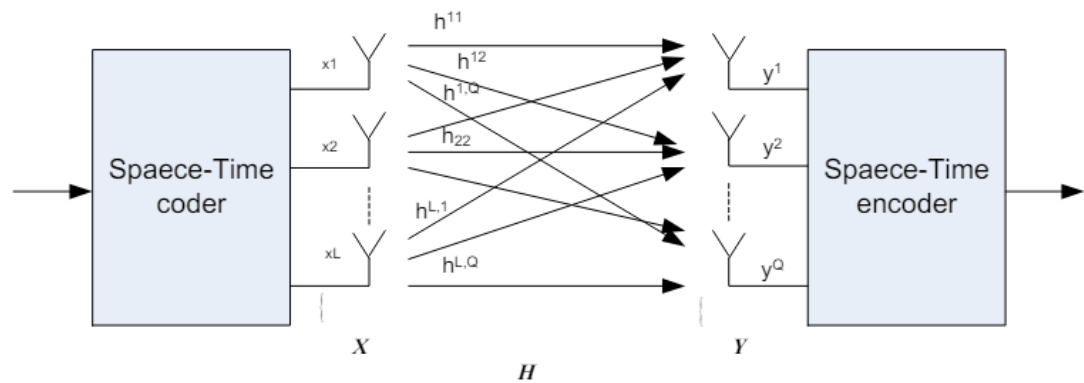


Рисунок 2.8 – Структура просторових каналів у системі зв'язку з МІМО

Для системи МІМО з L передавальних та Q приймальних антен та рівномірним розподілом потужності між усіма просторовими каналами можна використовувати такий вираз для питомої пропускної здатності [14]:

$$C = \log_2 \det \left(1 + \frac{h_{1q}^2}{L} H^H H \right), \quad (2.8)$$

де H – матриця каналу;

H^H - спряжена матриця каналу;

I – одинична $L \times Q$ матриця.

Використання питомої пропускної здатності як одного з показників ефективності МІМО має перевагу у тому, що вона не залежить від методів модуляції і кодування. Однак виграш у питомій пропускній здатності при зміні конфігурації МІМО може допомогти оцінити виграш за іншими критеріями, наприклад, залишаючи BER на прийнятному рівні. Моделювання проводилося за умови, що всі $L \times Q$ каналів між L передавальними та Q приймальними антенами є незалежними Гаусовими випадковими комплексними величинами з нульовими середніми значеннями [14].

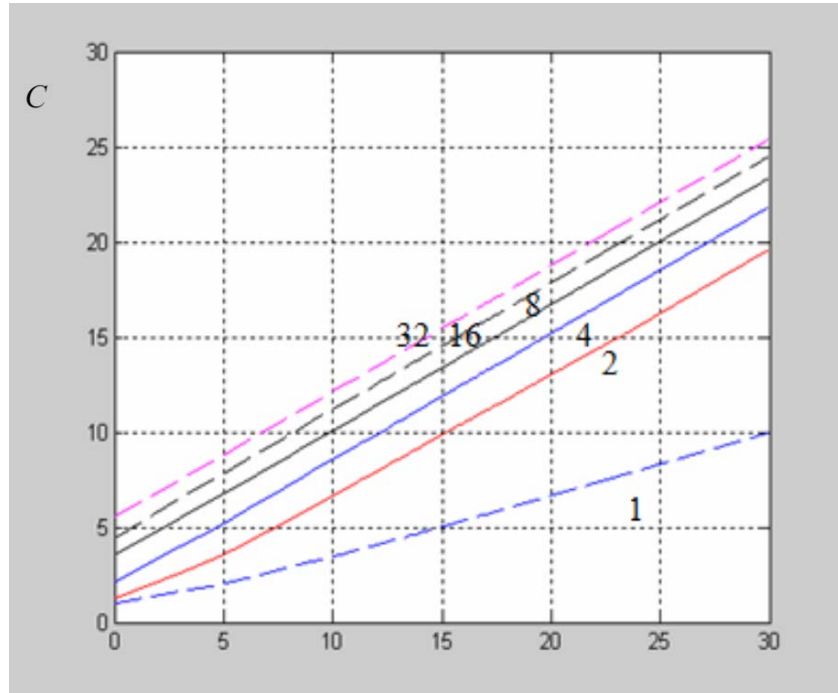


Рисунок 2.9 – Залежності пропускної здатності для МІМО-систем від С/Ш з двома передавальними ($L = 2$) і різною кількістю приймальних антен ($Q = 2, 4, 8, 16, 32$)

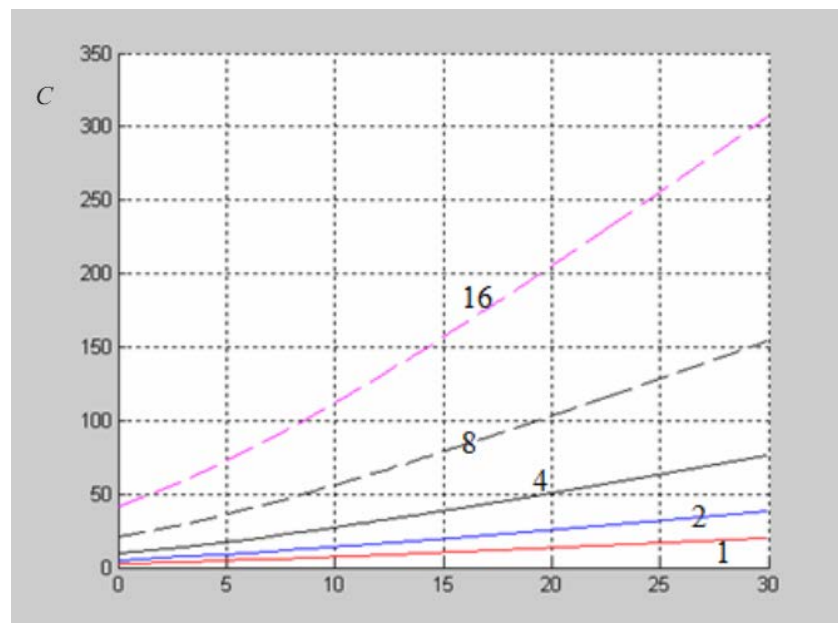


Рисунок 2.10 – Залежності пропускної здатності для МІМО-систем від С/Ш з однаковим числом передавальних і приймальних антен ($L=Q=2,4,8,16$)

Графіки на рис.2.9 показують залежність пропускної здатності від SINR для MIMO-систем з двома передавальними антенами ($L=2$) та різною кількістю приймальних антен ($Q = 2, 4, 8, 16, 32$). Для порівняння також показано криву для системи SISO ($L=1, Q=1$). Порівняння кривих демонструє значне збільшення швидкості передачі інформації при переході від системи SISO до MIMO.

2.3.2 Адаптивна модуляція в каналах MIMO

У сучасних багаточастотних системах зв'язку з технологією MIMO використання адаптивної модуляції є необхідним для підвищення якості зв'язку. Це досягається шляхом регулювання сигнального сузір'я в залежності від відношення сигнал-шум. При високому значенні SNR використовується більш висока позиційність модуляції, а при зниженні SNR позиційність зменшується. Цей механізм дозволяє системі уникнути впливу значних знижень якості зв'язку. Виграш від використання адаптивної модуляції аналізується за допомогою моделі, зображеної на рис 2.11.

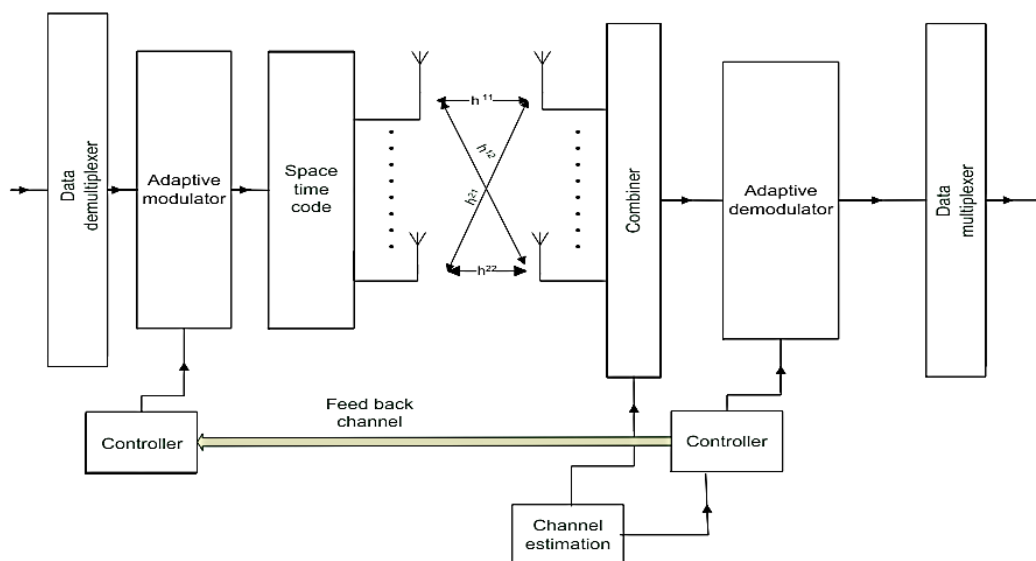
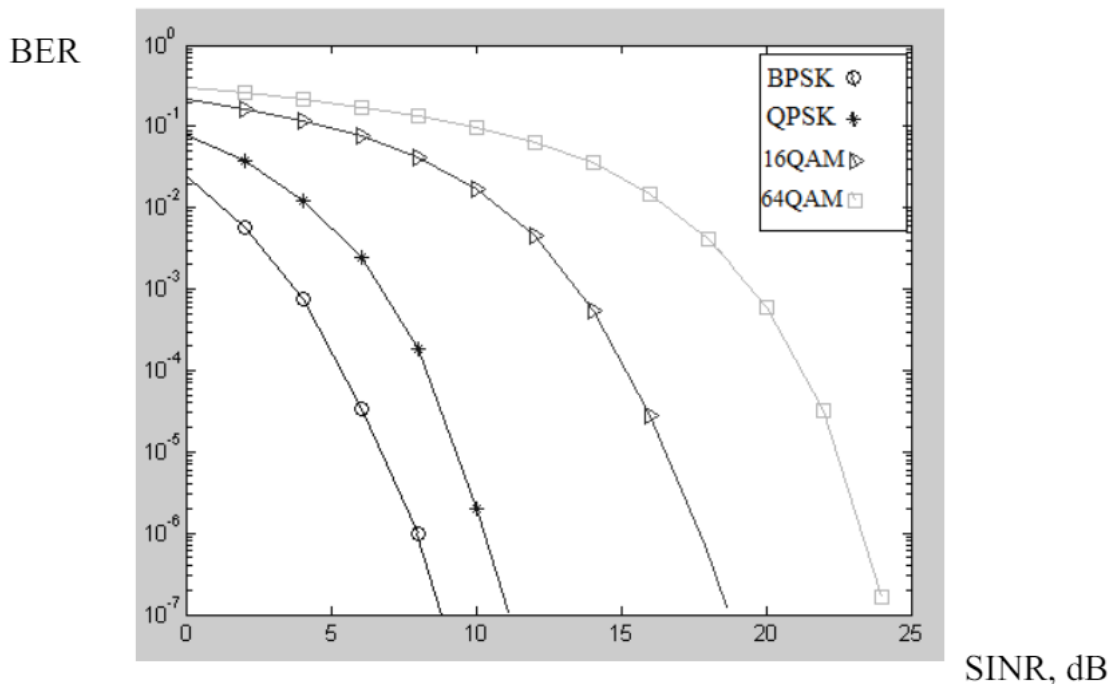


Рисунок 2.11 – Система зв'язку з MIMO та адаптивною багаторівневою модуляцією

Для модуляції m-QAM справедливий наступний вираз для BER:

$$P_b = \frac{2}{\sqrt{M} \log_2 \sqrt{M}} \times \sum_{k=1}^{\log_2 \sqrt{M}} \sum_{i=0}^{(1-2^{-k})} \left\{ (-1)^{\left\lfloor \frac{i2^{k-1}}{\sqrt{M}} \right\rfloor} \left(2^{k-1} - \left\lfloor \frac{i2^{k-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor \right) Q \left((2i+1) \sqrt{\frac{6 \log_2 M}{2(M-1)} \frac{E_b}{N_0}} \right) \right\}, \quad (2.9)$$

Залежені BER від SNR при різних сигнальних конфігураціях (див. рис. 2.12), показують можливість збереження заданого рівня BER, наприклад, 10⁻⁴, за рахунок переходу від модуляції 64QAM до BPSK при зниженні SINR до 5 дБ. Хоча ці результати демонструють лише максимальний виграш від адаптації типу модуляції сигналу до умов поширення (оскільки вони були отримані за умови сталого коефіцієнта матриці каналу, що не характерно для мобільного користувача), вони можуть бути корисними для створення загального алгоритму адаптивної модуляції для мобільних систем зв'язку з технологією MIMO. Фактично, кожен просторовий канал має свій коефіцієнт передачі або підсилення, який змінюється з часом [19].



Риунок 2.12 – Залежності BER від SNR при різних сигнальних конструкціях

$$Gain1 = (|h_{11}|^2 + |h_{21}|^2); \quad (2.10)$$

$$Gain1 = (|h_{12}|^2 + |h_{22}|^2). \quad (2.11)$$

Для системи MIMO 2x2, застосовані відповідно до рівнянь (2.10) та (2.11), показані на рис. 2.13 та 2.14.

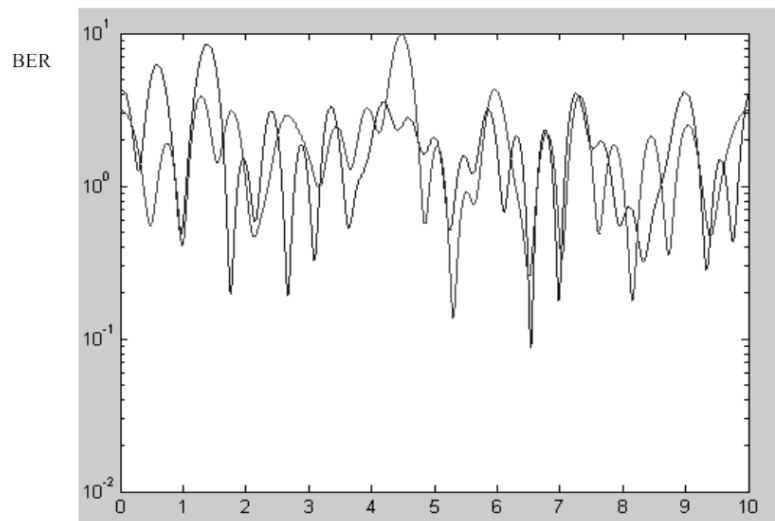


Рисунок 2.13 – Характер зміни BER у часі для фіксованого UE

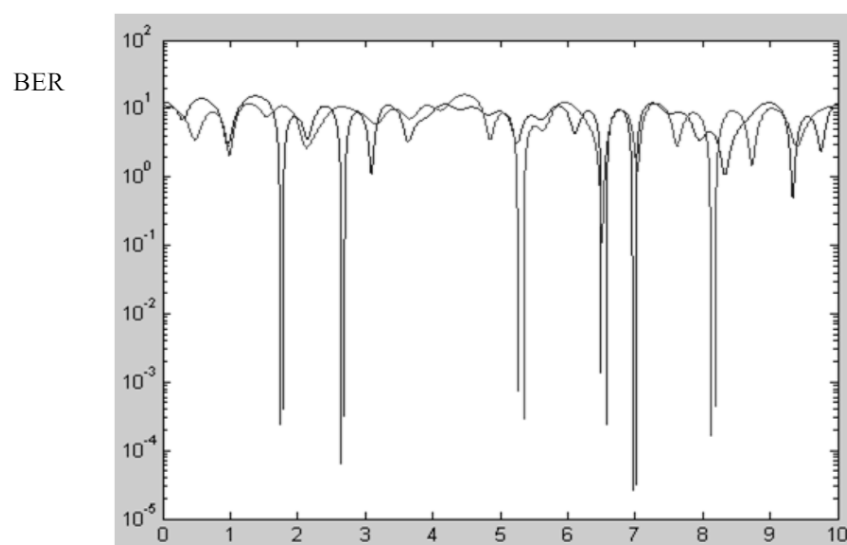


Рисунок 2.14 – Характер зміни BER у часі для мобільного UE

Припускається, що кожен коефіцієнт матриці каналу є випадковим Гаусовим процесом, і всі ці коефіцієнти матриці каналу некорельовані. Для стаціонарного терміналу зміни SINR можуть досягати 10 дБ. Для мобільного терміналу ці зміни є значно більшими, хоча і мають тенденцію до короткочасності.

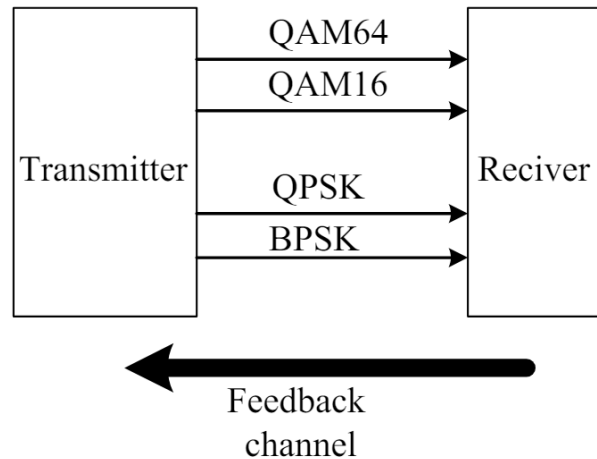


Рисунок 2.15 – Адаптивна модуляція у каналах MIMO з замкненим зворотним зв'язком

Адаптивна модуляція у каналах MIMO з замкненим зворотним зв'язком – це метод, за допомогою якого тип модуляції сигналу автоматично адаптується відповідно до умов каналу передачі та інформації, отриманої через зворотній зв'язок від приймача. Це дозволяє оптимізувати якість та ефективність передачі даних у мультиплексованих каналах з (MIMO) [18].

Це означає, що в кожному із власних каналів присутній лише свій власний символ, і вихідні шуми цих каналів є некорельованими. Оскільки у цьому випадку власні підканали є незалежними, можна реалізувати різну швидкість передачі даних у кожному з них. Це дозволить зберегти прийнятний рівень помилок блоку через вибір відповідних параметрів модуляції та кодування. Однак, це призводить до деякого ускладнення у пристроях

кодування/декодування та модуляції/демодуляції у різних підканалах. Можлива структура такої системи показана у Додатку А.

2.4 Висновки до розділу

Було розглянуто та проаналізовано різноманітні методи та стратегії для підвищення пропускної здатності та ефективності передачі даних у багаточастотних системах зв'язку.

Досліджено методи розширення спектру, зокрема математичні основи DSSS та методу псевдовипадкової перебудови робочої частоти. Виявлено, що ці методи дозволяють ефективно використовувати доступний спектр та забезпечують підвищення пропускної здатності.

Також, проаналізовано методи адаптації для підвищення пропускної здатності каналів багаточастотних систем зв'язку. Виявлено, що використання технології MIMO може значно покращити пропускну здатність шляхом одночасної передачі даних через кілька антенних елементів.

Також було досліджено важливість та ефективність адаптивної модуляції в каналах MIMO. Застосування цієї стратегії дозволяє системі ефективно пристосовуватися до змінних умов передачі даних та забезпечує підвищену надійність та швидкість передачі.

Усі ці методи та стратегії виявили свою ефективність у підвищенні швидкості передачі інформації та роботи багаточастотних систем зв'язку, що свідчить про їх важливість у сучасній телекомунікаційній індустрії.

3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БАГАТОЧАСТОТНОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ

3.1 Розрахунок загальної завадостійкості системи

Для наведеної у додатку А структури багаточастотної системи мобільного зв'язку побудуємо графік, що показує, як змінюється ймовірність помилкового прийому в залежності від співвідношення сигнал/шум.

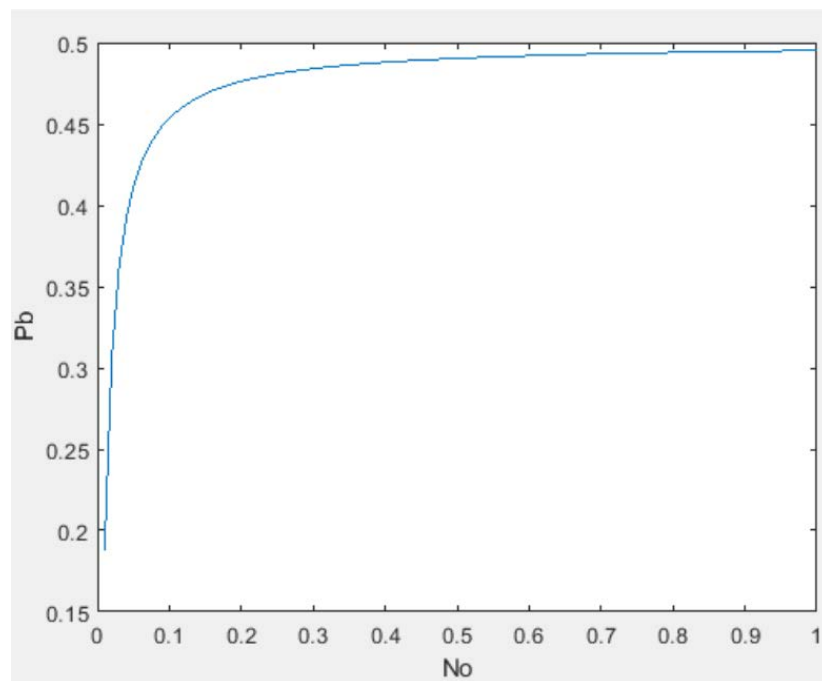


Рисунок 3.1 – Залежність ймовірності помилкового прийому від впливу шуму (N_0)

Ймовірність помилкового прийому інформаційного символу при впливі радіозавади та шуму представлена на рис. 3.2.

Залежність ймовірності помилкового прийому від впливу завад - це співвідношення між сигналом та шумом у каналі передачі і як це впливає на правильність прийому інформації. Ймовірність помилкового прийому зазвичай зростає, коли шум у каналі стає значним у порівнянні з сигналом. Це

може статися у випадку низького сигналу або високого рівня шуму, коли сигнал стає важче відрізнити від шуму.

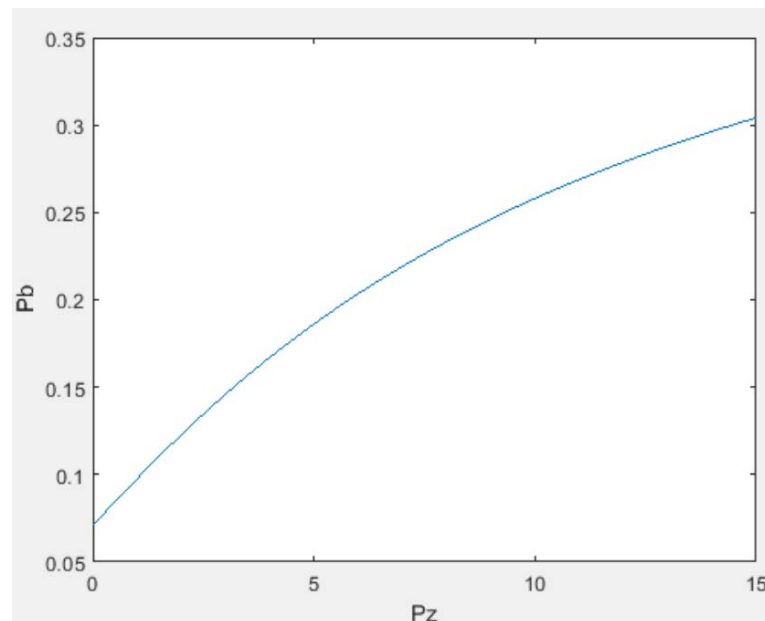


Рисунок 3.2 – Залежність ймовірності помилкового прийому від впливу завад (P_j)

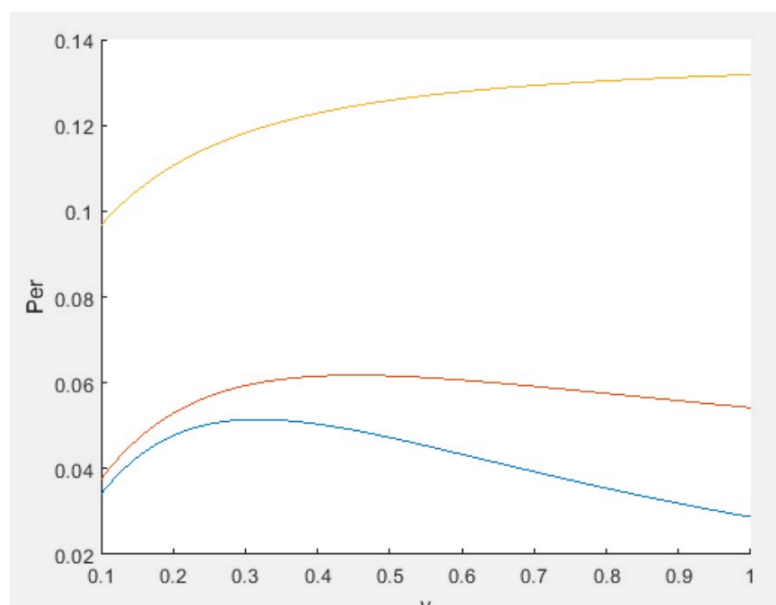


Рисунок 3.3 – Залежність ймовірності помилкового прийому від коефіцієнта γ при різних співвідношеннях сигнал/шум

Збільшення ймовірності помилкового прийому може призвести до недостовірності переданої інформації, що може мати негативний вплив на якість зв'язку. Дослідження залежності ймовірності помилкового прийому від впливу завад допомагає розробити ефективні стратегії зменшення впливу шуму на комунікаційні системи.

На рис. 3.5 представлено залежність ймовірності помилкового прийому від коефіцієнту γ при різних співвідношеннях сигнал/шум+завада.

Після аналізу графіка, наведеного на рисунку 3.5, можна зробити наступний висновок: коефіцієнт γ має оптимальні значення для різних співвідношень сигнал/завада, при яких ймовірність помилкового прийому досягає максимального рівня. Це означає, що існує оптимальне значення коефіцієнта γ , яке максимізує ефективність системи в умовах різних рівнів завади та сигналу.

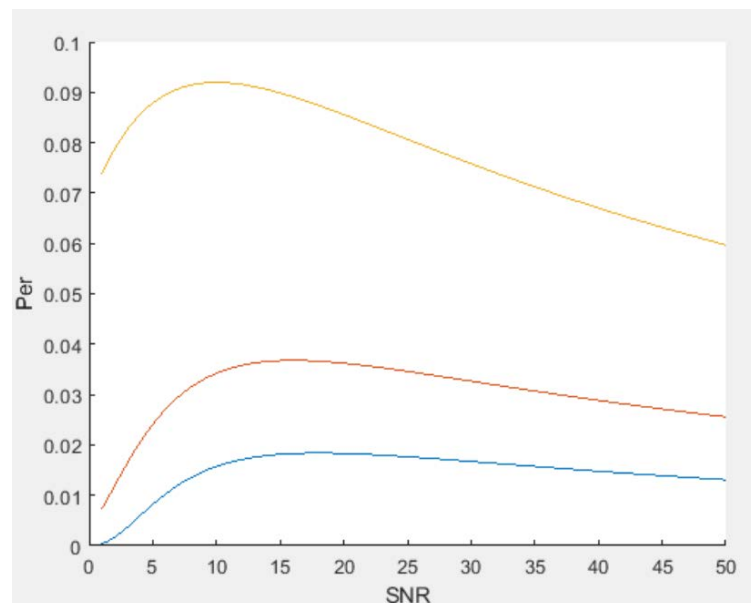


Рисунок 3.4 – Залежність ймовірності помилкового прийому сигналу при впливі завади на основний канал

Такий аналіз допомагає визначити оптимальні параметри системи для надійності прийому даних при будь-яких умовах роботи каналу зв'язку.

Графіки залежність ймовірності помилкового прийому від співвідношення сигнал/завада при впливі завади на різні канали демодулятора

наведені на рис. 3.4–3.6.

На графіках залежності ймовірності помилкового прийому при впливі завади на додатковий та головний канали ми бачимо, як змінюється ймовірність помилкового прийому в залежності від рівня завади в кожному з каналів.

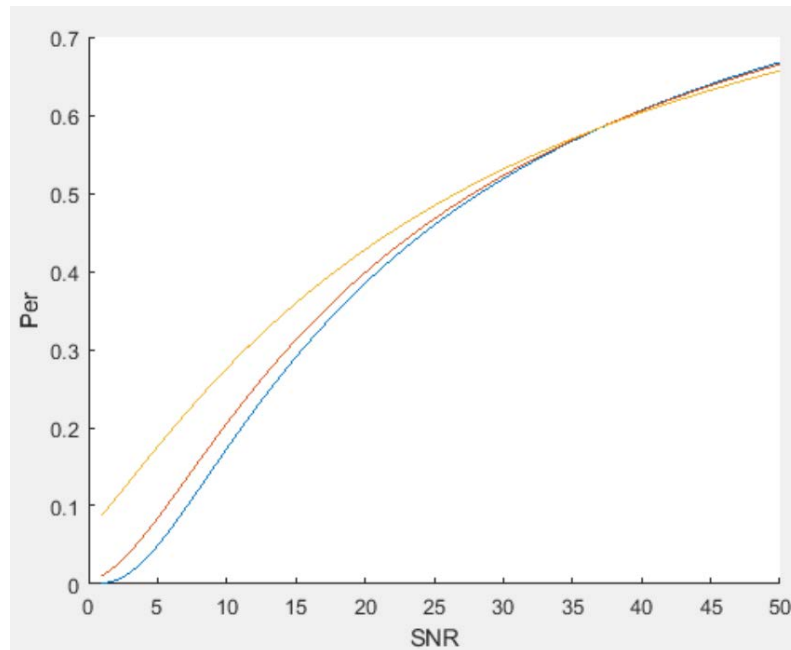


Рисунок 3.5 – Залежність ймовірності помилкового прийому при впливі завади на додатковий канал

Зазвичай графіки показують, як змінюється ймовірність помилкового прийому на основі різних значень співвідношення сигнал/шум для головного та додаткового каналів. Це дозволяє визначити оптимальні параметри для кожного каналу, при яких ймовірність помилкового прийому буде мінімізована або буде досягати прийнятних значень.

3.2 Дослідження математичної моделі системи зв'язку

Побудовано модель комунікаційної системи у середовищі інтерактивного моделювання, імітації та аналізу Simulink, використовуючи різноманітні об'єкти та функції з пакету інструментів Communications Toolbox. Цей набір

містить генератори сигналів, модулятори-демодулятори, моделі каналів зв'язку та широкий спектр методів та алгоритмів для аналізу результатів моделювання.

Загальний вигляд побудованої моделі каналу зв'язку наведено на рис. 3.6

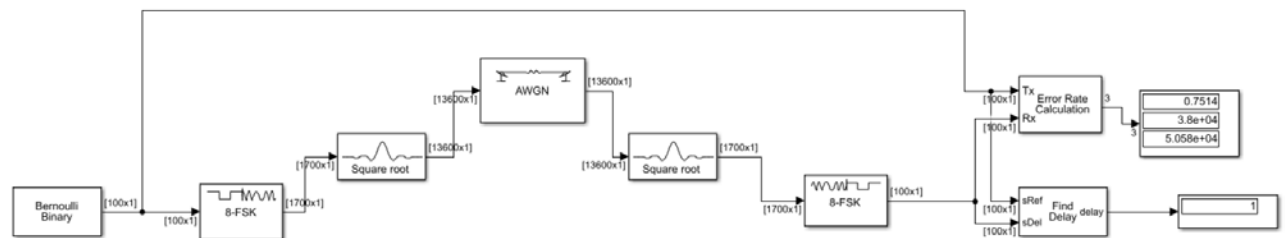


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд побудованої математичної моделі

Математична модель налаштована на опрацювання дискретних сигналів, що досягнуто завдяки налаштуванню рішення: discrete (no continuous states).

В якості джерела інформації для каналів використовується блок Bernoulli Binary, що генерує випадкові числа за розподілом Бернуллі. Вихідний тип даних встановлено як Double. Крім того, параметри Sample time, що представляє час вибірки вихідного сигналу, було встановлено на рівні 200 кГц, а кількість відліків на кадр вихідного сигналу було встановлено на рівні 10.

Результати роботи блоку демонструються на рис. 3.7, отримані завдяки використанню інструменту Time Scope.

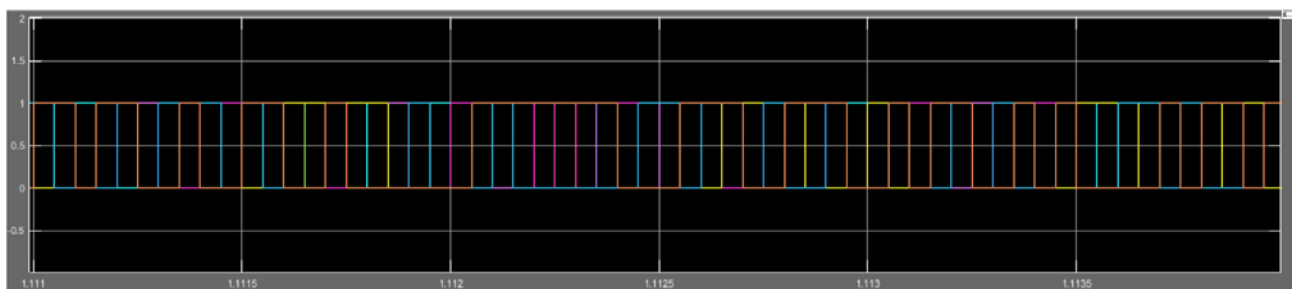


Рисунок 3.7 – Генерований сигнал блоку

Для модуляції було вибрано M-FSK, який є формою частотної модуляції, де для передачі інформації використовується кілька частот. Ця модуляція реалізована за допомогою блоків M-FSK Modulator Baseband і M-FSK Demodulator Baseband відповідно.

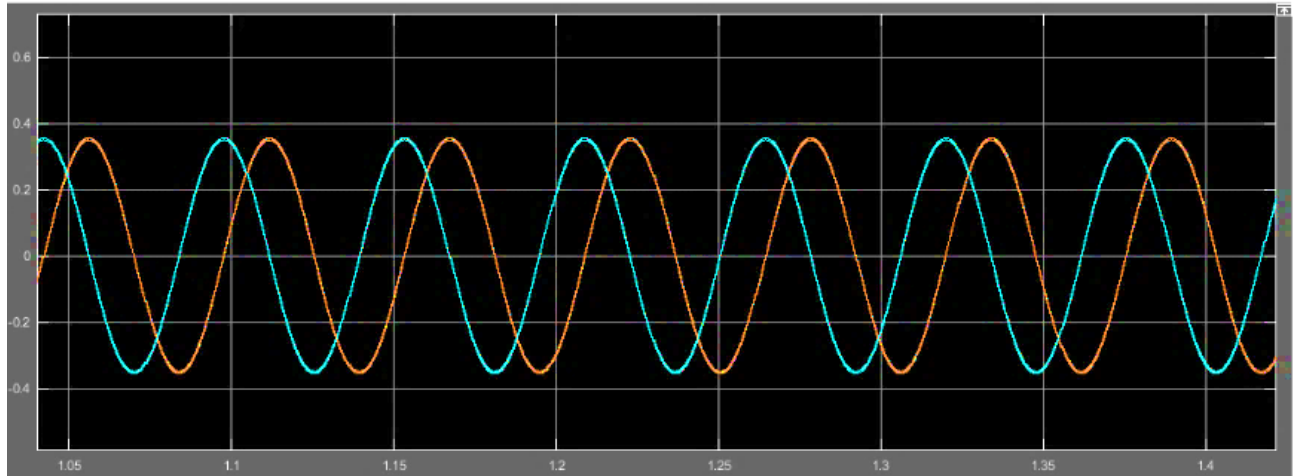


Рисунок 3.8 – Сигнал після модуляції

Фільтрація вихідного та вхідного сигналів (на приймальній стороні) здійснюється за допомогою Raised Cosine Transmit Filter та Raised Cosine Receiver Filter відповідно. Ці фільтри допомагають зменшити міжсимвольні спотворення сигналу. Головним параметром є коефіцієнт спаду, або Rolloff factor, який визначає розширення фільтру в пасивному діапазоні частот.

У ролі каналу зв'язку виступає AWGN Channel (канал адитивного білого гаусівського шуму). Шум у цьому каналі має нормальний розподіл і однакову спектральну потужність по всій полосі частот. Блок AWGN Channel генерує шум за допомогою блоку Random Source. Початкове значення для генерації випадкових значень можна встановити за допомогою параметру Initial seed.

У середовищі MATLAB Simulink можна змодельовати вплив шумів на систему радіозв'язку за допомогою блоку адитивного білого гаусівського шуму (AWGN). Зазначимо, що параметр SNR в цьому блоку встановлюється у децибелах. Дослідження впливу шуму проводилося шляхом моделювання

роботи системи з різними значеннями параметра SNR: 15, 10, 5, 2, 1.5 та 1 дБ. Моделювання виконувалося для систем з модуляціями M-FSK, QAM та QPSK.

Таблиця 3.1 – Значення параметрів BER для різних співвідношень сигнал/шум

SNR	M-FSK	QAM	QPSK
15	0,0291	0,0351	0,0339
10	0,0407	0,0615	0,0577
5	0,0729	0,1132	0,1075
2	0,121	0,1676	0,1605
1,5	0,1375	0,1709	0,171
1	0,1528	0,201	0,1915

Для кожного типу модуляції на рисунках 3.9–3.11 наведені окремі графіки, що відображають залежність BER від співвідношення сигнал/шум.

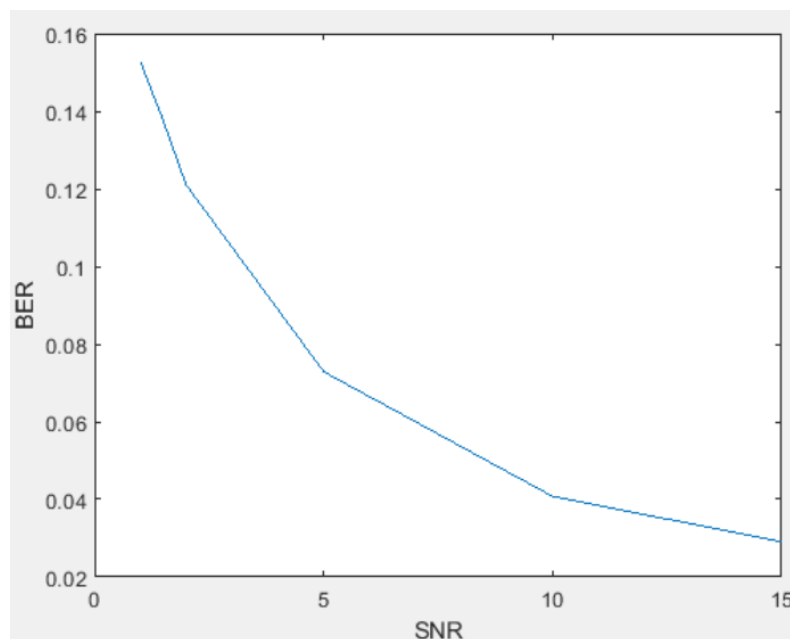


Рисунок 3.9 – Графік залежності для M-FSK

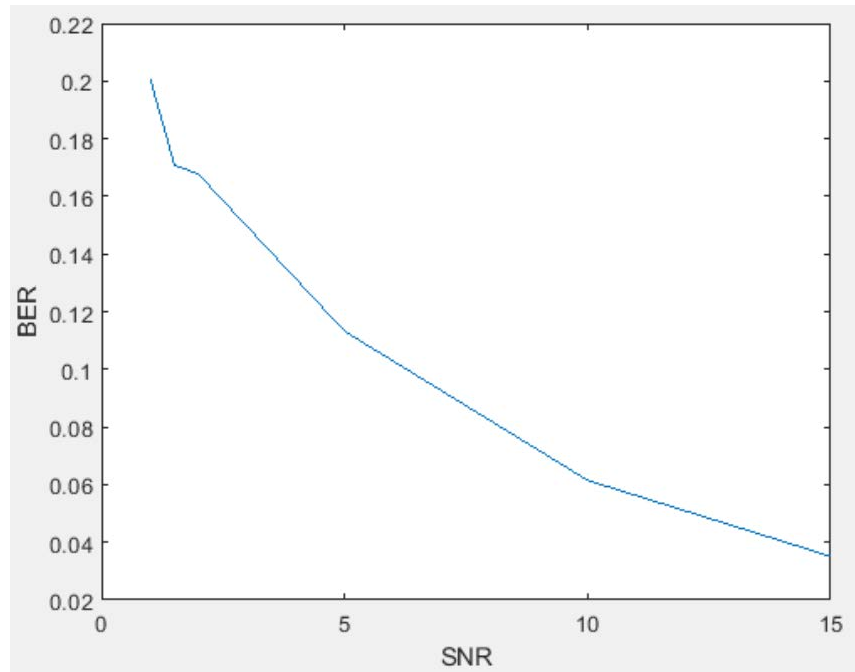


Рисунок 3.10 – Графік залежності для QAM

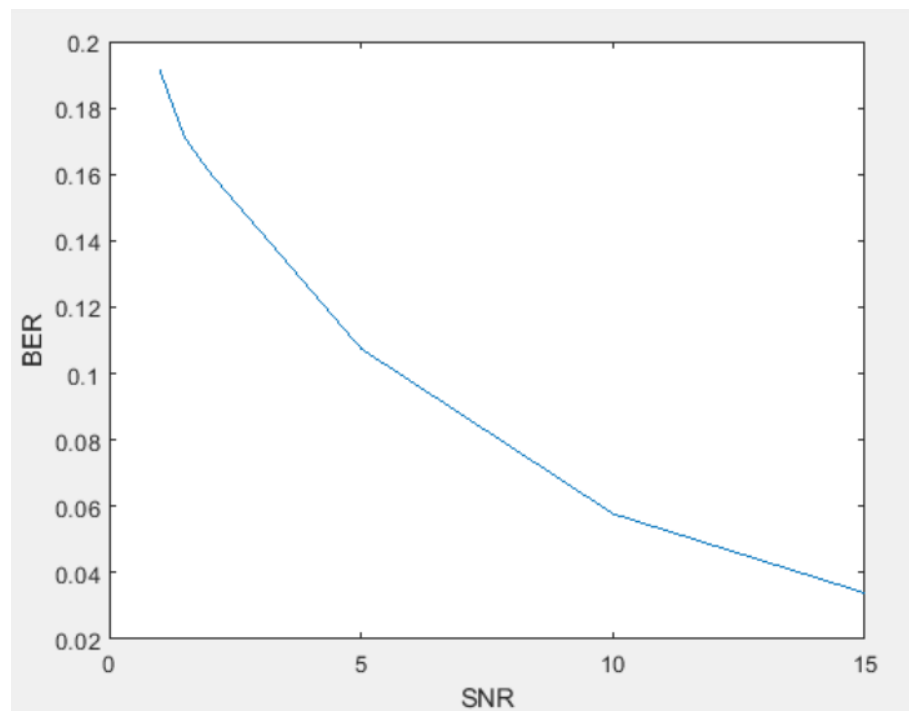


Рисунок 3.11 – Графік залежності для QPSK

Шумова завада модульована за амплітудою є основною та найпростішою радіо завадою для систем зв'язку.

Для дослідження впливу радіозавад на описану математичну модель було побудовано імітаційну модель генератора, наведену на рис. 3.12.

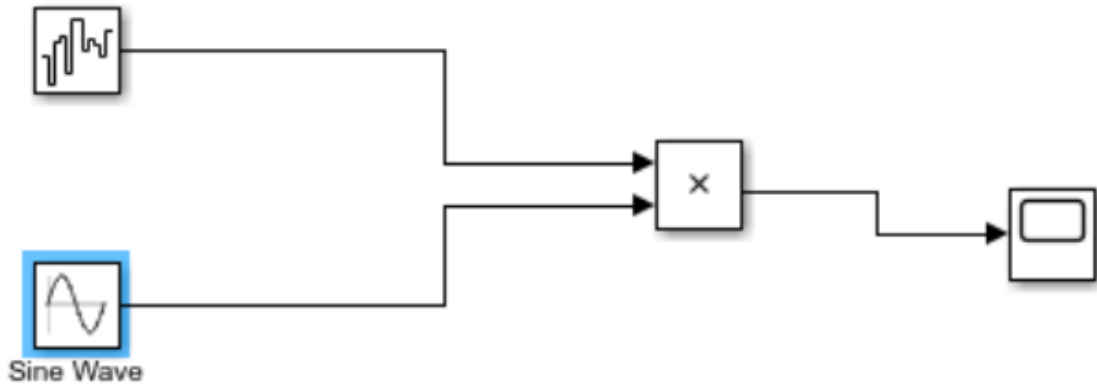


Рисунок 3.12 – Схема генератора шумової завади

На рисунку 3.13 показано частотне представлення отриманої радіозавади з параметром шумової потужності, який становить 0,1.

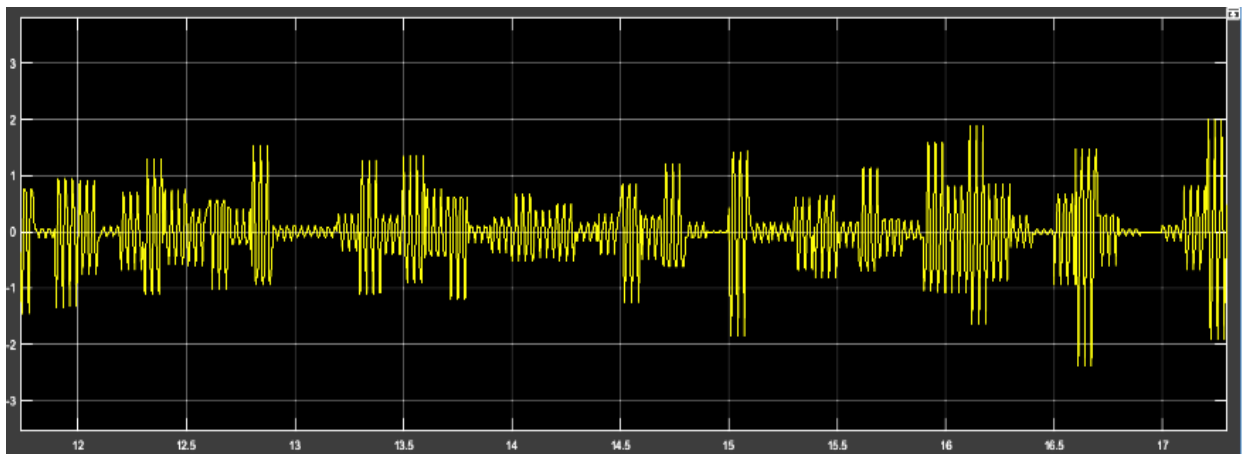


Рисунок 3.13 – Частотна характеристика отриманої радіозавади

При проведенні моделювання генератора завад буде розміщено після каналу зв'язку.

Застосування завади до каналу радіозв'язку відбувається за допомогою блоку Product.

Для синхронізації часових параметрів перед блоком Product встановлено блок Rate Transition. Таку ж структуру буде використано у подальших дослідженнях, що показано на рис. 3.14.

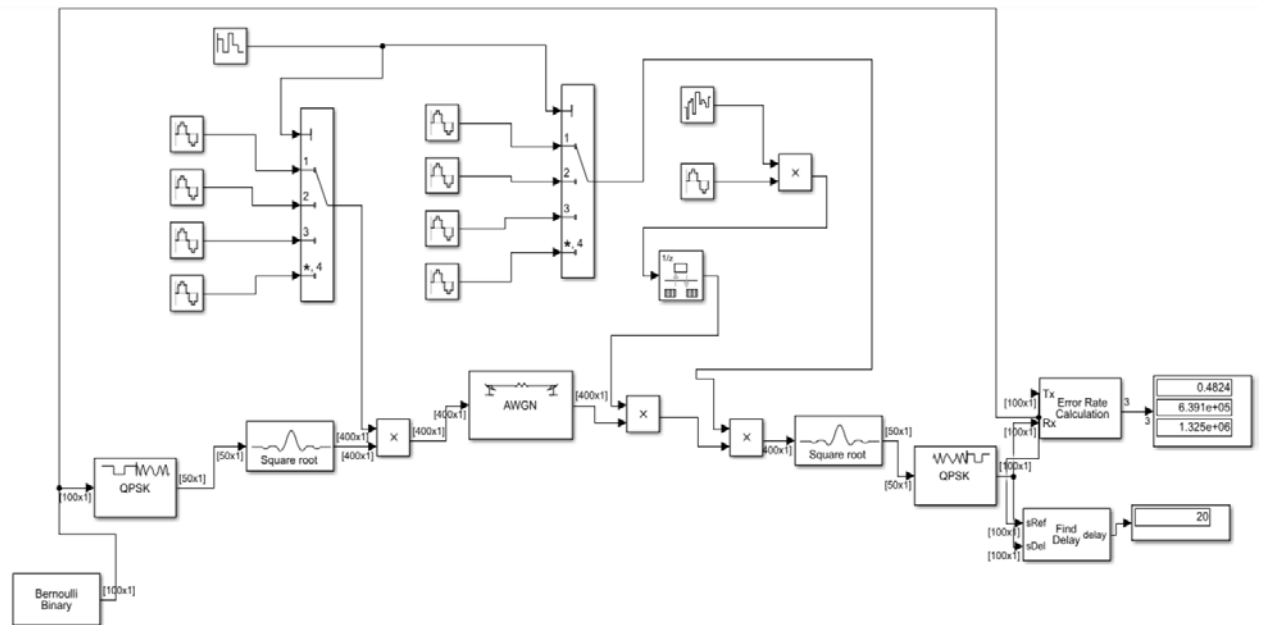


Рисунок 3.14 – Схема імітаційної моделі впливу завади на ЗРЗ

Результати функціонування моделі для різних модуляцій та значень параметру Noise power приведено нижче:

Таблиця 3.2 – Значення BER при різних рівнях шумової потужності

Noise power	M-FSK	QAM	QPSK
0,01	0,3923	0,5102	0,5389
0,05	0,4112	0,598	0,5615
0,1	0,4358	0,6782	0,6284

Залежність BER від потужності завади приведено на рис. 3.15 – 4.17.

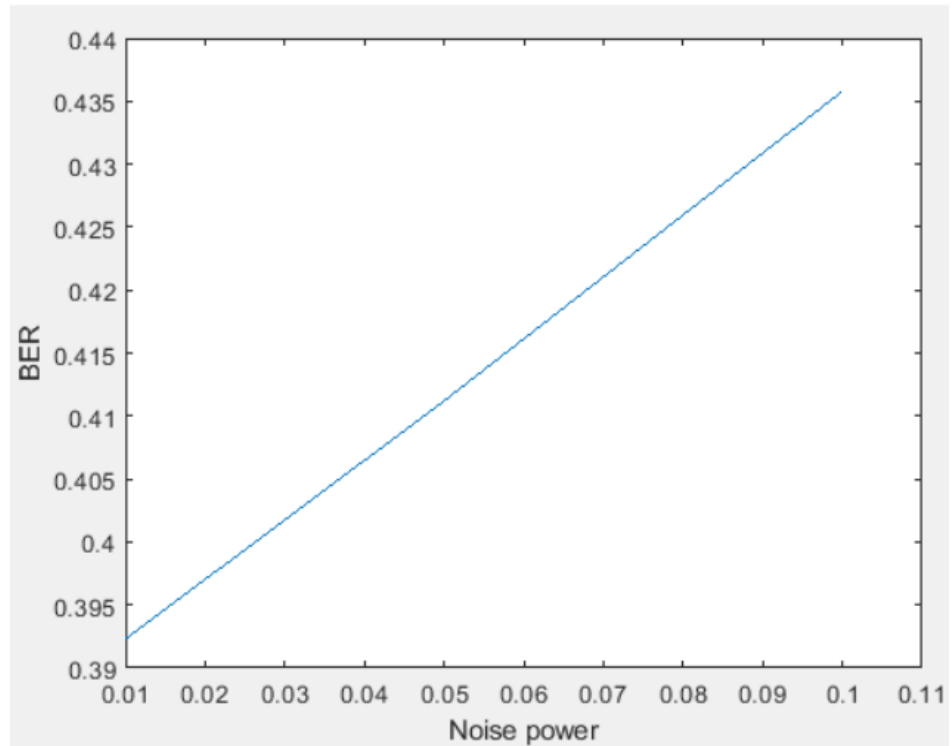


Рисунок 3.15 – Графік залежності для M-FSK

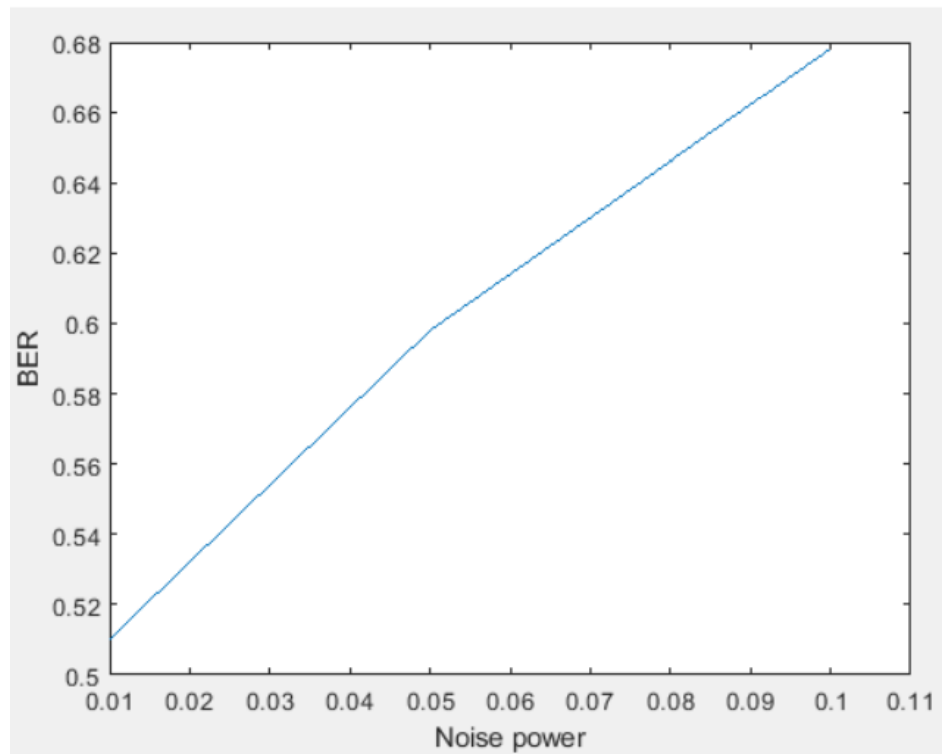


Рисунок 3.16 – Графік залежності для QAM

Аналіз результатів вказує на те, що модуляція M-FSK проявляє більшу стійкість до завад порівняно з QPSK та QAM модуляціями, що можна пояснити більшою стійкістю до міжфазних викривлень сигналів.

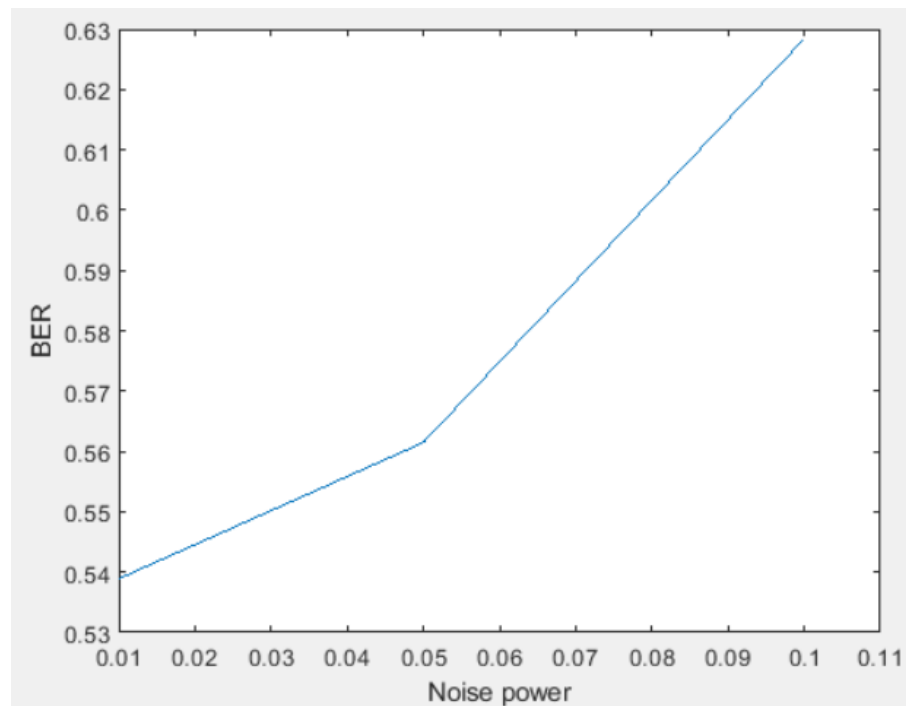


Рисунок 3.17 – Графік залежності для QPSK

Серед усіх факторів, які впливають на якість прийому сигналу, особливо суттєвим є вплив багатотональної радіоелектронної завади. Цей вид завади суттєво погіршує якість передачі даних, що виражається у значеннях параметру BER, що наближаються до випадкових.

Це означає, що при наявності багатотональної радіоелектронної завади сигнал може стати дуже схожим на випадковий шум, що значно ускладнює його коректне декодування та призводить до помилкового прийому даних. Цей висновок підкреслює важливість ефективної боротьби з радіоелектронними завадами для забезпечення надійності та ефективності систем зв'язку [20].

3.3 Висновки до розділу

Було проведено оцінку загальної завадостійкості системи шляхом аналізу математичної моделі. Результати вказують на те, що різні методи модуляції мають різний вплив на стійкість системи до різних видів завад. Наприклад, виявлено, що М-позиційна частотна модуляція виявляє більшу стійкість до міжфазних викривлень сигналів у порівнянні з QPSK та QAM модуляціями. Також було підтверджено, що багатотональна радіоелектронна завада найбільше впливає на якість прийому, що призводить до значень параметру BER, подібних до випадкових. Отримані результати сприяють кращому розумінню поведінки системи зв'язку в умовах різних видів завад, що є ключовим для подальшого вдосконалення систем та їх успішного застосування.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори можуть мати вплив на дослідника підвищення швидкості передачі інформації в системах зв'язку з багаточастотними сигналами наступні: підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; недостатнє освітлення робочої зони; недостатність природного освітлення; підвищений рівень шуму на робочому місці; відсутність чи нестача природного світла; фізичні перевантаження (статичні); нервово – психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, емоційні навантаження).

Відповідно до визначених факторів формуємо рекомендації щодо безпечних умов праці під час дослідження підвищення швидкості передачі інформації в системах зв'язку з багаточастотними сигналами.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Однією із характерних особливостей сучасного розвитку суспільства є зростання сфер діяльності людини, в яких використовуються інформаційні технології. Широке розповсюдження отримали персональні комп'ютери. Однак їх використання загостило проблеми збереження власного та суспільного здоров'я, вимагає удосконалення існуючих та розробки нових підходів до організації робочих місць, проведення профілактичних заходів для запобігання розвитку негативних наслідків впливу ПК на здоров'я користувачів.

Відповідно до встановлених гігієнічно-санітарних вимог (ДСН 3.3.6.042-99 [11]) роботодавець зобов'язаний забезпечити в приміщеннях з ПК допустимі параметри виробничого середовища.

Робоче місце дослідника підвищення швидкості передачі інформації в системах зв'язку з багаточастотними сигналами. повинне бути розташовані на

відстані не менше 1,5 м від стіни з вікнами, від інших стін – на відстані 1 м, від інших користувачів – на відстані не менше 1,5 м. Відносно вікон робоче місце доцільно розташувати таким чином, щоб природне світло падало на нього збоку, переважно зліва.

При розташуванні елементів робочого місця користувача ПК слід враховувати:

- робочу позу користувача;
- простір для розміщення користувача;
- можливість огляду елементів робочого місця;
- розміщення документації і матеріалів, які використовуються

користувачем.

Для забезпечення точного та швидкого зчитування інформації в зоні найкращого бачення площа екрана монітора повинна бути перпендикулярною нормальній лінії зору. При цьому повинна бути передбачена можливість переміщення монітора навколо вертикальної осі в межах $\pm 30^\circ$ (справа наліво) та нахилу вперед до 85° і назад до 105° з фіксацією в цьому положенні.

Клавіатура повинна бути розташована так, щоб на ній було зручно працювати двома руками. Клавіатуру слід розміщати на поверхні столу на відстані 100...300 мм від краю. Кут нахилу клавіатури до столу повинен бути в межах від 5° до 15° , зап'ястя на долонях рук повинні розташовуватись горизонтально до площини столу.

Для запобігання світлових відблисків від екрана, клавіатури в напрямку очей користувача від освітлювачів загального призначення або сонячних променів необхідно застосовувати антивідблискові сітки, спеціальні фільтри, захисні козирки, на вікнах регульовані жалюзі.

Принтер повинен бути розміщений у зручному для користувача положенні, так, що максимальна відстань від користувача до клавіш управління принтером не перевищувала довжину витягнутої руки

користувача.

Конструкція робочого стола повинна забезпечувати можливість оптимального розміщення на робочій поверхні обладнання, що використовується, з врахуванням його кількості та конструктивних особливостей (розмір монітора, клавіатури, принтера, ПК та ін.) і документів, а також враховувати характер роботи, що виконується.

Згідно з вимог електробезпеки, під час проектування та експлуатації систем електропостачання для ПК необхідно дотримуватись вимог.

Лінія електромережі для живлення ПК, периферійних пристроїв ПК та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ПК під час проектування виконана як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів.

Категорія умов по небезпеці електротравматизму – без підвищеної небезпеки, у зв'язку з відсутністю факторів підвищеної та особливої небезпеки [12].

Для запобігання електротравмам у приміщенні здійснюються:

1) ізоляція нормально струмоведучих елементів електроустаткування відповідно з вимогами нормативів;

2) захисне заземлення із використанням природних заземлювачів;

3) систематичне проходження інструктажу з електробезпеки.

Вимоги безпеки перед початком роботи:

1. Перевірити надійність встановлення апаратури на робочому столі.

2. Перевірити загальний стан апаратури, справність проводки електромережі, з'єднувальних шнурів, штепсельних вилок та розеток, заземлення захисного екрана.

3. Відрегулювати освітленість робочого місця.

4. Відрегулювати і зафіксувати висоту стільця (крісла), зручний для користувача нахил його спинки.

5. Увімкнути апаратуру ПК вмикачами на корпусах в такій послідовності: стабілізатор (або блок безперервного живлення), ВДТ, системний блок, принтер (якщо передбачається друкування).

6. Відрегулювати яскравість світіння екрану ВДТ, контрастність.

7. При появі несправностей комп'ютерної техніки повідомити керівника.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

За енерговитратами робота дослідника підвищення швидкості передачі інформації в системах зв'язку з багаточастотними сигналами згідно Гігієнічної класифікація праці [1] відноситься до категорії I б. Нормовані значення параметрів мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.4.1

Таблиця 4.1 - Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Легка I б	22-28	40-60	0,1-0,3
Холодний		20-24	75	0,2

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату здійснюються такі заходи:

1. Температура в приміщенні в холодний період року підтримується за допомогою системи центрального опалення.
2. Використовується передбачається припливна вентиляційна система.
3. Здійснюється систематичне вологе прибирання.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Шкідливі речовини – речовини, які при контакті з організмом людини внаслідок порушення технологічного процесу викликають професійні захворювання, виробничі травми або відхилення стану здоров'я.

Шкідливі речовини у повітря робочої зони поступають у вигляді пару, газів та пилу. Вплив на організм людини залежить від хімічного складу, розміру (дисперсності), форми часток та їх кількості у одиниці об'єму. Найбільш небезпечний високодисперсний пил (розміром < 5 мкм), а також гострокрайовий пил. Високодисперсний пил найбільш глибоко проникає та затримується у легенях.

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [11]. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

Для забезпечення складу повітря робочої зони слід використовувати механічну вентиляцію та забезпечити регулярне прибирання.

4.2.3 Виробниче освітлення

Природне освітлення повинно бути боковим, бажано одностороннім. Для уникнення засліплюючої дії сонячних променів найкраще, коли світлові

отвори (вікна) зорієнтовані на північ чи північний схід. Коефіцієнт природної освітленості (КПО) повинен бути не нижче 1,5%.

У приміщенні, де проводиться дослідження підвищення швидкості передачі інформації в системах зв'язку з багаточастотними сигналами використовується штучне та природне освітлення. Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 4.3:

Таблиця 4.3 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 3) Штучне освітлення в приміщенні забезпечується світильниками типу РСР08×250 (однолампові) з лампами ДРЛ-250.

4.2.4 Виробничий шум

У приміщеннях з ПК рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.037-99 [10].

Рівні шуму на робочих місцях осіб, що працюють з ПК, визначені ДСанПіН 3.3.2-007-98 [9]. Допустимі значення звукового тиску під час проектування лабораторного стенду наведені в табл.4.4.

Таблиця 4.4 - Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін;
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

4.2.5 Виробничі випромінювання

В умовах, що розглядаються, діють електромагнітні випромінювання. Джерелами електромагнітних випромінювань являються ПК, дослідницькі установки та вимірювальні пристрої.

Рівні електромагнітного випромінювання та магнітних полів повинні відповідати вимогам. Рівні інфрачервоного випромінювання не повинні перевищувати граничних. Рівні ультрафіолетового випромінювання не повинні перевищувати допустимих [9].

Гранично допустима напруженість електростатичного поля на робочих місцях не повинна перевищувати рівнів [6].

Заходи щодо зменшення впливу на працівника електромагнітного випромінювання: оптимальна організація робочого місця, доцільне розміщення технологічного устаткування, дотримання гігієнічно-обґрунтованих режимів праці та відпочинку, зменшення часу перебування у зоні опромінення.

4.3 Пожежна безпека

Приміщення, де здійснюється дослідження підвищення швидкості передачі інформації в системах зв'язку з багаточастотними сигналами відноситься до категорії пожежної безпеки В (табл.4.5).

Таблиця 4.5 – Категорія приміщення за вибухопожежною і пожежною небезпекою

Категорія приміщення	Характеристика речовин і матеріалів, що знаходяться (обертаються) у приміщенні
В Пожежонебезпечна	Тверді горючі та важкогорючі речовини і матеріали, за умови, що приміщення, в яких вони знаходяться, не відносяться до категорій А, Б і питома пожежна навантага для твердих і рідких легкозаймистих та горючих речовин на окремих ділянках площею не менше 10 м ² кожна перевищує 180 МДж/м ² .

Конструкція будівлі, де розміщено приміщення, відноситься до II-го ступеня вогнестійкості (будівля з несучою конструкцією з природних матеріалів або штучного каменю, бетону або залізобетону з застосуванням листових і плиткових негорючих матеріалів).

Згідно з правилами улаштування електроустановок, приміщення відноситься до класу II-Па пожежної небезпеки (приміщенні, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали).

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

До причин, що можуть спричинити пожежу в приміщенні, відносяться:

- короткі замикання;
- перевантаження електромережі і перегріву струму несучих частин та з'єднань;
- порушення правил техніки безпеки.

При виникненні аварійних ситуацій відбувається різке виділення теплової енергії, яка може стати причиною виникнення пожежі.

Заходи щодо запобігання пожежі:

- систематична перевірка на справність струмоведучих частин обладнання;
- систематичне проведення протипожежного інструктажу;
- дотримання вимог пожежної безпеки на робочому місці.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

У приміщенні можливе використання системи автоматичного пожежогасіння. Також потрібно використовувати установку порошкового пожежогасіння, що використовує у якості вогнегасної речовини спеціальний порошок, який є нетоксичним. Для подачі сигналів про пожежу у приміщенні встановлено пожежну сигналізацію.

Після закінчення роботи від усіх електроприладів, а також з мереж їх живлення повинна бути відключена напруга (за винятком протипожежних та охоронних установок). Електропроводи для підключення комп'ютерів, приладів повинні прокладатися по негорючих конструктивних елементах.

Згідно норм [7] на кожні 20 м² площі приміщення вказаних категорії та класу пожежовибухонебезпеки та можливих класів пожеж – А, В і Е розміщується один порошковий або вуглекислотний вогнегасник з масою

заряду від 3 до 5 кг. Крім того на поверсі, де знаходиться приміщення слід забезпечити наявність двох порошкових вогнегасники з масою заряду 10 кг.

Тому в приміщенні буде розташовуватися два порошкових вогнегасники, які будуть розміщуватись в різних його кінцях, на висоті не більше 1,5 м від рівня підлоги до нижнього торця вогнегасника і на відстані від дверей, достатній для їх повного відчинення. Підходи до місця розташування вогнегасників мають бути завжди вільними. Для зазначення місцезнаходження вогнегасників буде встановлений вказівний знак. Знак розташовують на видних місцях на висоті 2,0 - 2,5 м від рівня підлоги.

4.4 Висновки до розділу

В результаті виконання цього розділу було опрацьовано такі питання охорони праці, як технічні рішення стосовно: гігієни праці та виробничої санітарії, мікроклімат приміщень, виробниче освітлення, виробничий шум та випромінювання. Також розглянуто пожежна безпека у виробничих приміщеннях та технічні рішення системи запобігання пожежі та систем протипожежного захисту.

ВИСНОВКИ

Було проведено детальний аналіз основних технічних аспектів систем зв'язку з багаточастотними сигналами, зокрема технології OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Визначено концепцію багаточастотних систем і розглянуто їх основні характеристики, які включають в себе часові та частотні параметри сигналів OFDM.

Було розглянуто принципи передавання та прийому сигналів OFDM, включаючи процеси модуляції, демодуляції, а також синхронізації сигналів. Особливу увагу приділили смузі займаних частот і спектральним маскам, які визначають ширину каналу та роблять систему стійкою до міжсимвольних перешкод.

Також, детально розглянуто процеси формування та прийому сигналів OFDM. Вивчено, процес перетворення цифрового потоку інформації в сигнал OFDM та основні етапи, що необхідно пройти від модуляції до демодуляції.

Також було описано, як фазова синхронізація та корекція передавальної характеристики каналу відбуваються за допомогою пілотних підносійних, що дозволяє ефективно відновлювати сигнал у приймачі.

Отже, було отримано глибоке розуміння аспектів систем зв'язку з багаточастотними сигналами, що є важливим для їх ефективного застосування у різних сферах телекомунікацій та бездротового зв'язку.

Було розглянуто та проаналізовано різноманітні методи та стратегії для підвищення пропускної здатності та ефективності передачі даних у багаточастотних системах зв'язку.

Досліджено методи розширення спектру, зокрема математичні основи DSSS та методу псевдовипадкової перебудови робочої частоти. Виявлено, що ці методи дозволяють ефективно використовувати доступний спектр та забезпечують підвищення пропускної здатності.

Також, проаналізовано методи адаптації для підвищення пропускну здатності каналів багаточастотних систем зв'язку. Виявлено, що використання технології MIMO може значно покращити пропускну здатність шляхом одночасної передачі даних через кілька антенних елементів.

Також було досліджено важливість та ефективність адаптивної модуляції в каналах MIMO. Застосування цієї стратегії дозволяє системі ефективно пристосовуватися до змінних умов передачі даних та забезпечує підвищену надійність та швидкість передачі. Усі ці методи та стратегії виявили свою ефективність у підвищенні швидкості передачі інформації та роботи багаточастотних систем зв'язку, що свідчить про їх важливість у сучасній телекомунікаційній індустрії.

Було проведено оцінку загальної завадостійкості системи шляхом аналізу математичної моделі. Результати вказують на те, що різні методи модуляції мають різний вплив на стійкість системи до різних видів завад. Наприклад, виявлено, що M-позиційна частотна модуляція виявляє більшу стійкість до міжфазних викривлень сигналів у порівнянні з QPSK та QAM модуляціями. Також було підтверджено, що багатотональна радіоелектронна завада найбільше впливає на якість прийому, що призводить до значень параметру BER, подібних до випадкових. Отримані результати сприяють кращому розумінню поведінки системи зв'язку в умовах різних видів завад, що є ключовим для подальшого вдосконалення систем та їх успішного застосування.

У роботі також наведено було опрацьовано такі питання охорони праці, як технічні рішення стосовно: гігієни праці та виробничої санітарії, мікроклімат приміщень, виробниче освітлення, виробничий шум та випромінювання. Також розглянуто пожежна безпека у виробничих приміщеннях та технічні рішення системи запобігання пожежі та систем протипожежного захисту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вишневський, В.М. Широкопasmові бездротові мережі передачі інформації/ В.М. Вишневський, А.І. Ляхов, С.Л. Кравець, І.В. Шахновіч // М.: Техносфера, 2005. - 591с.
2. Бабіч В.Д. Граничні інформаційні можливості багатопозиційних багаточастотних сигналів з фазовою та амплітудно-фазовою маніпуляцією / В.Д. Бабіч, С.Г. Пасічник, А.В. Яриловець // Зв'язок. – 2006. – Вип. 5. – С. 55 – 58.
3. Чистяков, В. А. Аналіз технологій бездротової передачі даних / В. А. Чистяков, Б. Є. Миктибаєв, А. Б. Жанбеков // Журнал наукових і прикладних досліджень. - 2016. - №1. - С. 166-169
4. Бакитом, А. Б. Технологія широкопasmового бездротового доступу / А. Б. Бакитом, Ян. А. Ратахін, Ж. К. Ташенова // Актуальні питання технічних наук. Матеріали III Міжнародної наукової конференції. - 2015. - С. 41-43
5. Пат. 17330 Україна, МПК НО4Н 1/100. Спосіб передавання багатопозиційних багаточастотних сигналів / В.Д. Бабіч, А.В. Яриловець, С.Г. Пасічник. – № u 2006 03799; заявл. 06.04.06; опубл. 15.09.06, Бюл. № 9. – 4 с.
6. Яриловець А.В. Аналіз стану та перспективи розвитку телекомунікаційних мереж / А.В. Яриловець, В.Д. Назарук, С.В. Зайцев // Вісник Черніг. держ. технол. ун-ту. – 2012. – Вип. 2. – С. 60 – 70.
7. Zakharchenko N. Information security of Time-Controlled Signals in Confidential Communication Systems / N. Zakharchenko, V. Korchinsky, B. Radzimovsky // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: XI International Conference TCSET 2012, (Lviv-Slavske, 21-24 february 2012) – Lviv; Publishing House of Lviv Polytechnic, 2012. С. 317
8. Zakharchenko M. Integrated methods of information security in telecommunication systems / Zakharchenko M., Korchynskii V., Kildishev V. 2017

International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017), IEEE Xplore Digital Library. 11 – 15 September 2017. – V. 1. – pp. 78–81. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8095366/>.

9. Skopa O. Korchinsky. V. Management of Relative Effective Transmission Rate in Packet Switching Networks . Proceedings of the International Conference TCSET'2002, February 18-23, 2012 Lviv-Slavsko, Ukraine, 2 p

10. Volodymyr Korchinskyi, Matin Hadzhyiev, Pavlo Pozdniakov, Vitalii Kildishev, Valeriy Hordiichuk Development of the procedure for forming non-stationary signal structures based on multicomponent LFM signals . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies / Information and controlling system.2018. №6/9(96). Vol 6.pp. 29-37

11. Korchynskyi V. V., Kildishev V. I., Holey D.V., Berdnikov O. M. Increasing the secrecy of transmission information based on combined random coding // National University «Zaporizhzhia Polytechnic» Radio Electronics, Computer Science, Control The scientific journal, 2019. № 3(50). pp. 108-116.

12. V Hordiichuk, A Shyshatskyi2, V Korchinskyi, Timing pulse code modulation as a tool for quantization noise reduction in special-purpose IT systems 1, Journal of Physics:Conference Series .2021. ICOLSSTEM 2020 IOP Publishing.

13. Максимова, А. А. Оптимізація бездротових мереж зв'язку на основі методів штучного інтелекту / А.А. Максимова, В.М.Кострова, А.А. Андросов // Моделювання, оптимізація та інформаційні технології.2016. №2. С.185-190.

14. Мирончук О.Ю. Порівняння методів оцінки параметрів каналу зв'язку в OFDM системах / О.Ю. Мирончук, О.О. Шпилька // Вісник Інженерної академії України – 2018. – №2. – с. 20-26.

15. Myronchuk O. Two-stage Channel Frequency Response Estimation in OFDM Systems / O. Myronchuk, O. Shpylka, S. Zhuk // Path of Science, Vol. 6, No. 2, pp. 1001-1007, – 2020. doi:<http://dx.doi.org/10.22178/pos.55-1>.

16. Myronchuk O. Yu. Two-Stage Method for Joint Estimation of Information Symbols and Channel Frequency Response in OFDM Communication Systems / O. Yu. Myronchuk, A. A. Shpylka, S. Ya. Zhuk // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2020.- Vol. 63. – No. 8, pp. 418 – 429
17. Myronchuk O., Shpylka O., Smolych D. Kalman filter for channel estimation in OFDM systems. The Eighth World Congress "Aviation in the XXI-st century" – "Safety in Aviation and Space Technologies", Kyiv, Ukraine, october 10-12, 2018. p 546-548.
18. Климаш М.М. Проектування ефективних систем безпроводного зв'язку [Текст] / М.М. Климаш, В.О. Пелішок. – Львів, 2010. – 232 с.
19. Кабак В.С. Функціональні пристрої телефонів мобільного зв'язку: навч. посібник [Текст] / В.С. Кабак, Р.В. Уваров. – Запоріжжя, 2017. – 375 с.
20. Theodor S. Rappaport. Wireless Telecommunications. Principles and practice. – Prentice Hall 9. Harada H. Simulation and software radio for mobile telecommunications [Текст] / H. Harada, R. Prasad. – Artech House, 2013. – 465 p.
21. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.2010 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>.
22. ДСТУ OHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог OHSAS 18001:2007 (OHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с.
23. ДСНіПЗ.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>.
24. НПАОП 40.1-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок (Правила устройства электроустановок. Электрооборудование специальных установок). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

25. ДСТУ EN 62305:2012 Блискавкозахист (європейський стандарт ІЕС 62305:2010). URL: <https://tdsb.com.ua/ru/dstu-en-62305/>.
26. ДСТУБ В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
27. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.
28. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf
29. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zpr.ua/norm_npraop_0_00-7_15-18_01_ua.php
30. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>
31. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
32. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>
33. СН N 4557-88 Санитарные нормы ультрафиолетового излучения в производственных помещениях - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.znaytovar.ru/gost/2/455788_Sanitarnye_normy_ultraf.html

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ
ЗВ'ЯЗКУ З БАГАТОЧАСТОТНИМИ СИГНАЛАМИ

(назва бакалаврської дипломної роботи)

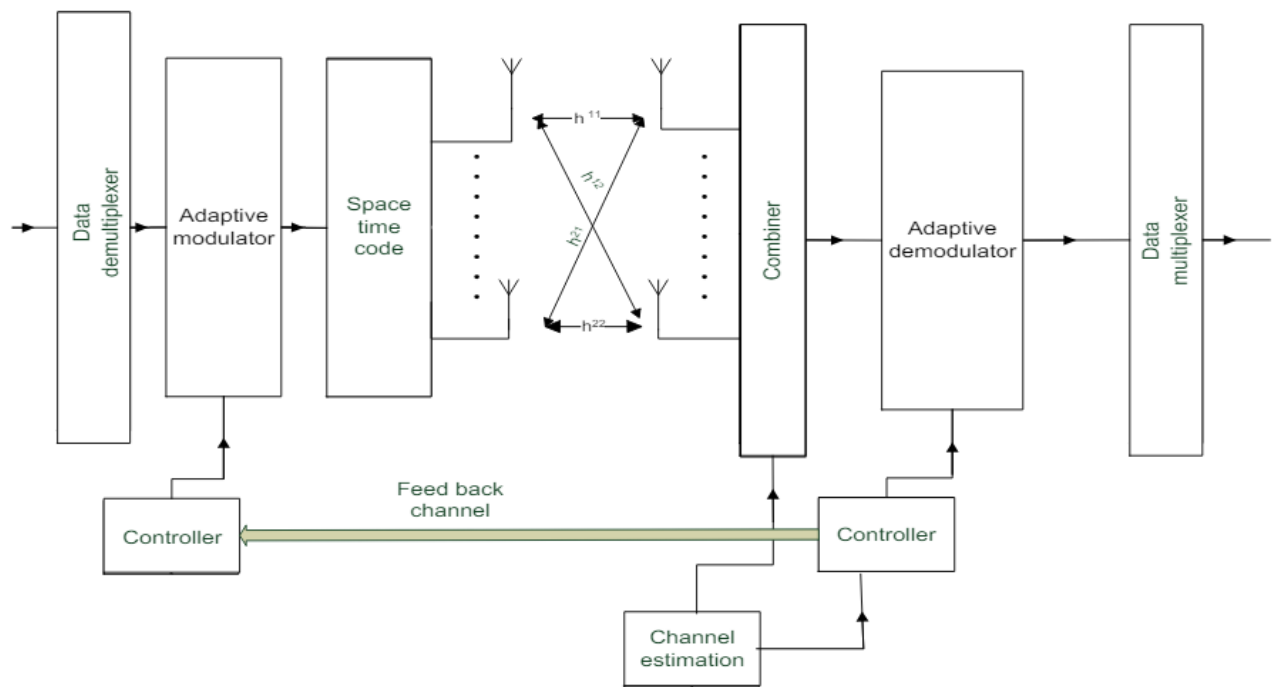


Рисунок А.1 – Система зв'язку з МІМО та адаптивною багаторівневою модуляцією

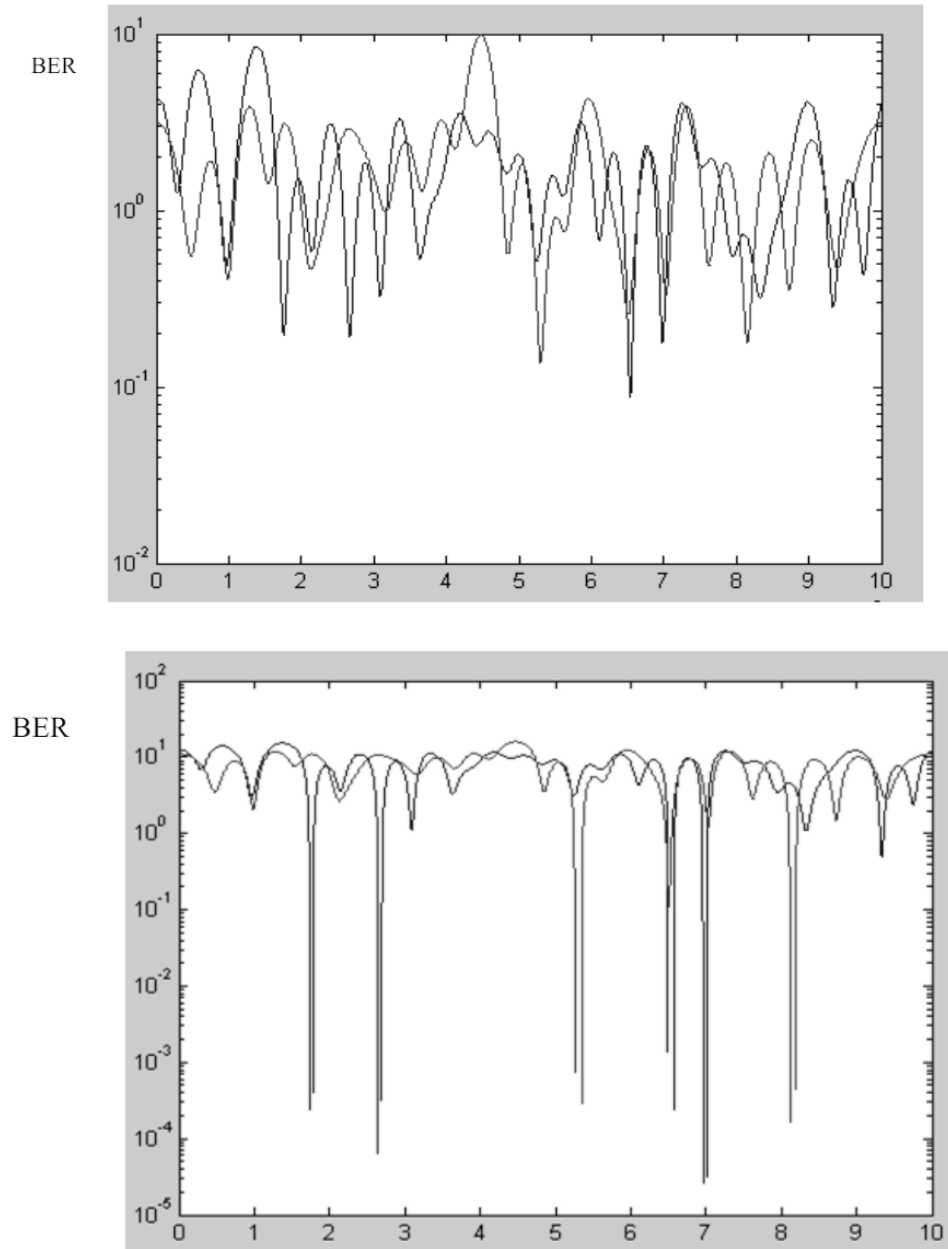
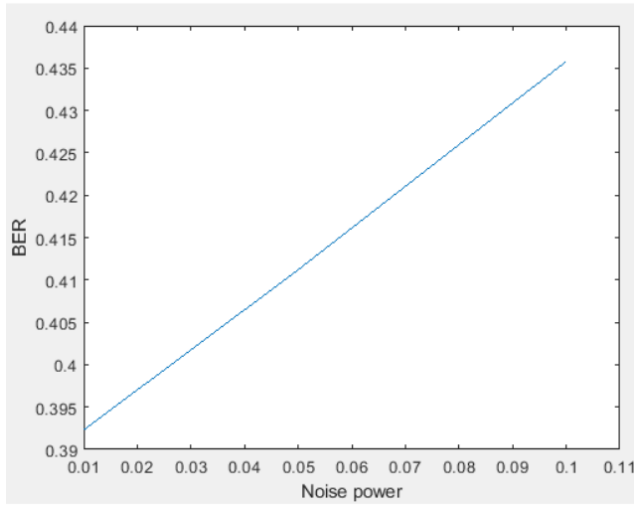
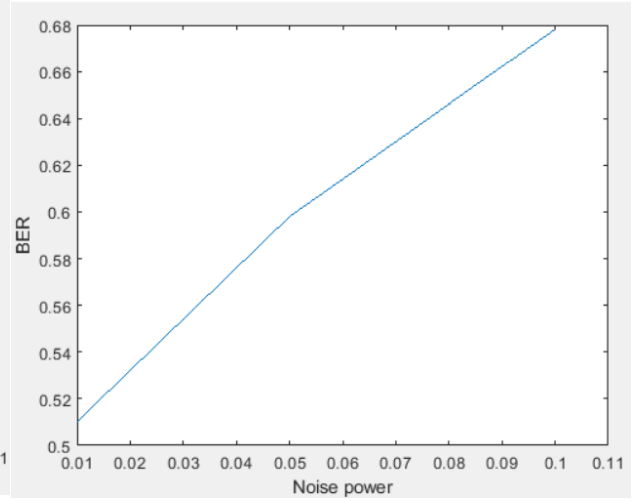


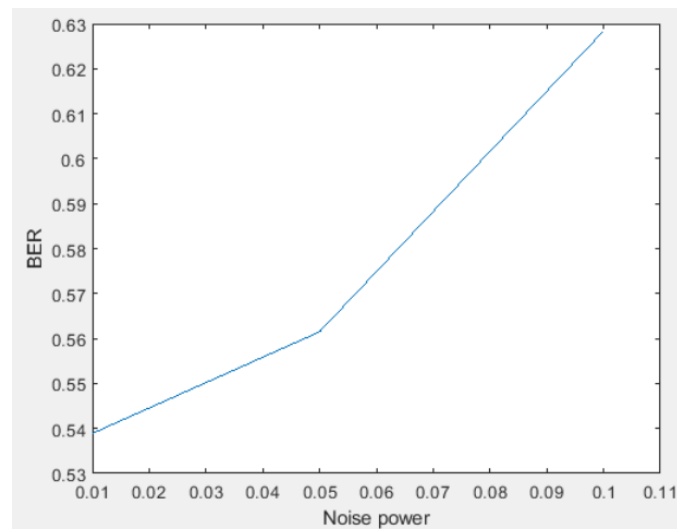
Рисунок А.2 – Характер зміни BER у часі для для фіксованого (а) та мобільного (б) UE при адаптивній MIMO



а)



б)



в)

Рисунок А.3 – Графіки залежностей BER від потужності завади для модуляцій: а) M-FSK; б) QAM; в) QPSK

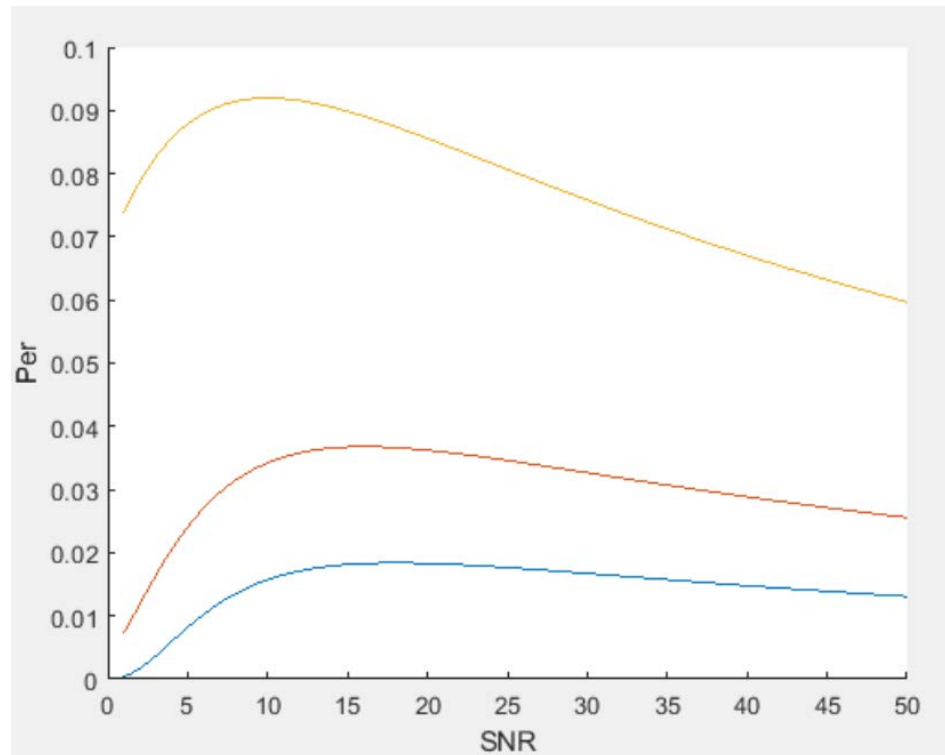


Рисунок А.4 – Залежність імовірності помилкового прийому сигналу при впливі завади на основний канал

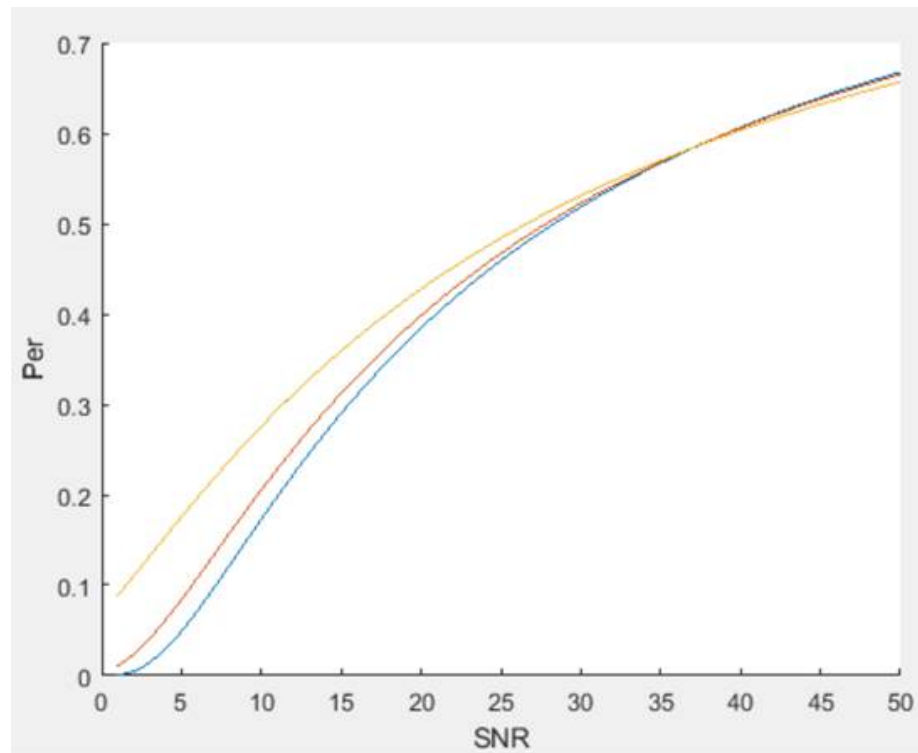


Рисунок А.5 – Залежність ймовірності помилкового прийому при впливі завади на додатковий канал

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Підвищення швидкості передачі інформації в системах зв'язку з багаточастотними сигналами

Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра Інфокомунікаційних систем і технологій, факультет Інформаційних електронних систем
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

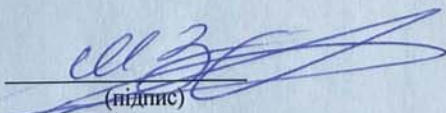
Оригінальність 87,5% Схожість 12,5%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

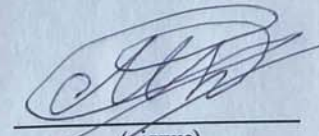
☒ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

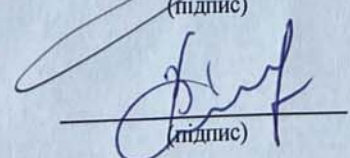
☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

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

Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи  Мельник Д.С.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи  Воловик А.Ю.
(підпис) (прізвище, ініціали)