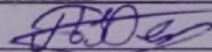


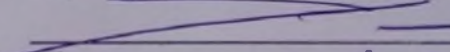
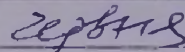
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОЄДНАННЯ АЛГОРИТМУ INTERLEAVING ТА
ТЕХНОЛОГІЇ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ В УМОВАХ ЗНАЧНИХ ЗАВАД

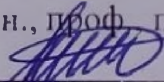
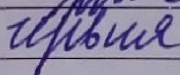
Виконав: студент 4-го курсу, групи ПЗТ-216
спеціальності 172 –Телекомунікації та
радіотехніка

 Поліщук Ю. О.

Керівник: к.т.н., доц., професор каф. ІКСТ

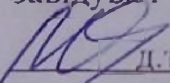
 Барась С. Т.
« 11 »  2025 р.

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

 Семенов А.О.
« 12 »  2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 12 »  2025 р.

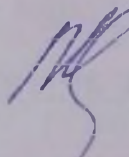
Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)

Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

 Завідувач кафедри ІКСТ
д.т.н., професор В.М. Кичак
« 5 » 05 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ
Поліщуку Юрію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Ефективність поєднання алгоритму interleaving та технології
множинного доступу в умовах значних завад

керівник роботи Барась Святослав Тадіонович, канд. техн. наук, доцент,

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

затверджені наказом ВНТУ від “20” березня 2025 року № 97

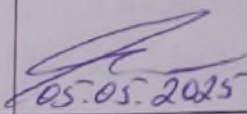
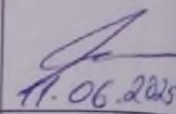
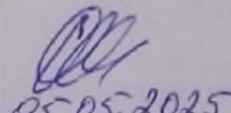
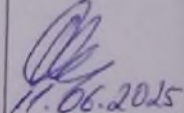
2. Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: LTE: високочастотний діапазон (2,6 та 1,8 ГГц) та
нижні частоти (700–900 МГц); Wi-Fi 6: частоти 2,4 та 5 ГГц; технології OFDMA
та INTERLEAVING; висота базової станції 17 м, висота абонентської станції 1,5
м; зниження BER з 10^{-3} до 10^{-5} для модуляції 16-QAM; види модуляції QPSK,
16-QAM, 64-QAM, 256-QAM.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які
потрібно розробити): вступ, загальна характеристика умов роботи безпроводних
систем і огляд стандартів з поєднанням технологій OFDMA та interleaving,
структура каналів передачі систем LTE та Wi-Fi 6, технологія OFDMA у
стандартах LTE та Wi-Fi 6, енергетичні розрахунки каналів передачі LTE,
охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Модель багатопроменевого поширення радіосигналу. Структурна схема каналу
передачі системи безпроводного зв'язку. Структурна схема каналу на основі
турбокодів. Принцип блочного перемешування та деперемешування. Основні
відмінності interleaving у LTE та Wi-Fi 6. Структурна схема формування та
обробки сигналів у системі OFDM. Структура OFDM-сигналу із захисним
інтервалом. Розподіл каналного ресурсу. Розподіл каналу 20 МГц на ресурсні
блоки. Динамічний розподіл каналів для користувачів.

6. Консультанти розділів роботи

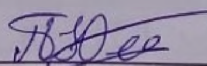
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання п
Спеціальна частина	Барась С. Т., професор кафедри ІКСТ	 05.05.2025	 11.06.2025
Охорона праці	Дембіцька С.В професор кафедри БЖДПБ	 05.05.2025	 11.06.2025

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент


(підпис)

Поліщук Ю. О.

Керівник роботи


(підпис)

Барась С. Т.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.317.73

Поліщук Ю. О. Ефективність поєднання алгоритму interleaving та технології множинного доступу в умовах значних завад. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – програмне забезпечення телекомунікаційних систем. Вінниця: ВНТУ, 2025. 97 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 19 назв; рис.: 23; табл.: 9.

Робота присвячена дослідженню безпроводних мереж стандартів LTE та Wi-Fi 6, у яких поєднані алгоритм interleaving та технологія множинного доступу з ортогональним частотним розділенням OFDMA для ефективної роботи в умовах значної завадової обстановки.

Метою дослідження є оцінка ефективності поєднання алгоритму interleaving та технології множинного доступу з ортогональним частотним розділенням у безпроводних мережах в умовах значних завад.

Основними завданнями роботи є аналіз умов роботи безпроводних систем та огляд стандартів з поєднанням технологій OFDMA та interleaving, аналіз структури каналів передачі систем LTE та Wi-Fi 6, оцінка ефективності алгоритму interleaving у стандартах LTE та Wi-Fi 6 та оцінка ефективності технології OFDMA у стандартах LTE та Wi-Fi 6.

Робота містить п'ять розділів. У першому розділі виконано аналіз умов роботи безпроводних систем та огляд стандартів з поєднанням технологій OFDMA та interleaving.

У другому розділі досліджені структури каналів передачі систем LTE та Wi-Fi 6.

У третьому розділі дана оцінка ефективності технології OFDMA у стандартах LTE та Wi-Fi 6.

У четвертому розділі виконано енергетичні розрахунки низхідного та висхідного каналів передачі LTE.

У п'ятому розділі виконано розрахунки, які стосуються охорони праці та безпеки життєдіяльності.

Ключові слова: мережі LTE та Wi-Fi 6, interleaving та множинний доступ, ефективність, значні завади, розрахунки, охорона праці.

ABSTRACT

Polishchuk Yu. O. The effectiveness of combining the interleaving algorithm and multiple access technology in conditions of significant interference. Bachelor's qualification work in specialty 172 - telecommunications and radio engineering, educational program - software for telecommunications systems. Vinnytsia: VNTU, 2025. 97 p.

In Ukrainian. Bibliography: 19 titles; fig.: 23; table.: 9.

The work is devoted to the study of wireless networks of the LTE and Wi-Fi 6 standards, in which the interleaving algorithm and OFDMA orthogonal frequency division multiple access technology are combined for effective operation in conditions of significant interference.

The purpose of the study is to assess the effectiveness of combining the interleaving algorithm and orthogonal frequency division multiple access technology in wireless networks in conditions of significant interference.

The main objectives of the work are to analyze the operating conditions of wireless systems and review standards with a combination of OFDMA and interleaving technologies, analyze the structure of transmission channels of LTE and Wi-Fi 6 systems, evaluate the effectiveness of the interleaving algorithm in LTE and Wi-Fi 6 standards, and evaluate the effectiveness of OFDMA technology in LTE and Wi-Fi 6 standards.

The work contains five sections. The first section analyzes the operating conditions of wireless systems and reviews standards with a combination of OFDMA and interleaving technologies.

The second section examines the structures of transmission channels of LTE and Wi-Fi 6 systems.

The third section evaluates the effectiveness of OFDMA technology in LTE and Wi-Fi 6 standards.

The fourth section performs energy calculations of the downlink and uplink LTE transmission channels.

The fifth section performs calculations related to occupational health and safety.

Keywords: LTE and Wi-Fi 6 networks, interleaving and multiple access, efficiency, significant interference, calculations, occupational safety.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА УМОВ РОБОТИ БЕЗПРОВІДНИХ СИСТЕМ І ОГЛЯД СТАНДАРТІВ З ПОЄДНАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ OFDMA ТА INTERLEAVING	8
1.1 Огляд стандартів з поєднанням OFDMA та interleaving	8
1.2 Типові проблеми при передачі радіосигналів	11
1.2.1 Згасання сигналу	12
1.2.2 Тіньові зони	13
1.2.3 Багатопроменове поширення сигналу	14
1.2.4 Завмирання сигналу	15
1.3 Методи розв'язання проблем	17
1.3.1 Перемежування (interleaving)	18
1.3.2 Рознесений прийом (Antenna Diversity)	19
1.3.3 Адаптивна корекція (Adaptive Equalization)	21
1.3.4 Завадостійке кодування	22
1.3.5 Управління потужністю (Power control)	23
1.4 Висновки до розділу	24
2 СТРУКТУРА КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ СИСТЕМ LTE ТА Wi-Fi 6	26
2.1 Загальна характеристика каналів передачі	26
2.2 Узагальнена структура каналу з OFDMA	28
2.2.1 Канальне кодування	31
2.2.2 Первинний рівень інтерлівінгу.....	35
2.2.3 Interleaving у стандарті LTE	36
2.2.4 Interleaving у стандарті Wi-Fi 6	38
2.3 Висновки до розділу	40
3 ТЕХНОЛОГІЯ OFDMA У СТАНДАРТАХ LTE ТА Wi-Fi 6	42
3.1 Технологія OFDM	42
3.2 Технологія OFDMA у стандарті Wi-Fi 6	50

3.3	Технічні можливості OFDMA в Wi-Fi 6	54
3.4	Технологія OFDMA у стандарті LTE	57
3.5	Висновки до розділу	63
4	ЕНЕРГЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ LTE.....	64
4.1	Розрахунок висхідного каналу.....	64
4.1.1	Розрахунок граничної потужності сигналу на вході приймача базової станції.....	64
4.1.2	Визначення потужності сигналу мобільної станції.....	66
4.1.3	Розрахунок ефективно випромінюваної потужності мобільної станції.	67
4.1.4	Визначення максимально допустимих втрат.....	67
4.2	Розрахунок низхідного каналу.....	68
4.2.1	Визначення граничної потужності сигналу на вході приймача мобільної станції.....	68
4.2.2	Визначення потужності сигналу базової станції.....	69
4.2.3	Розрахунок ефективно випромінюваної потужності базової станції....	69
4.2.4	Розрахунок допустимих втрат на трасі.....	69
4.3	Висновки до розділу.....	70
5	ОХОРОНА ПРАЦІ	71
5.1	Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	72
5.2	Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	75
5.2.1	Мікроклімат.....	75
5.2.2	Склад повітря робочої зони.....	76
5.2.3	Виробниче освітлення.....	77
5.2.4	Виробничий шум.....	78
5.2.5	Виробничі випромінювання.....	79
5.3	Пожежна безпека.....	80
5.3.1	Технічні рішення системи запобігання пожежі	81
5.3.2	Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	81
5.4	Висновки до розділу.....	82

ВИСНОВКИ	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	86
Додаток А (обов'язковий) - Ілюстративний частина	88
Додаток Б – Протокол перевірки кваліфікаційної роботи	96

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AP - Access Point (точка доступу)

BSS – Base Station Subsystem (підсистема базових станцій)

CRC - Cyclic Redundancy Check (циклічний надлишковий код)

eNB - evolved Node B (удосконалена базова станція)

GSM - Global System for Mobile Communications (міжнародний стандарт для мобільного цифрового стільникового зв'язку)

LDPC – Low-density parity-check code (код перевірки парності)

MIMO - multiple-input multiple-output

MS - Mobile Station (мобільна станція)

OFDM - orthogonal frequency division multiplexin

OFDMA - orthogonal frequency division multiple access

RUs - Resource Units (ресурсні блоки)

SC-FDMA - Single Carrier Frequency division multiple access

STA – Station (безпроводна станція)

TDMA - Time division multiple access (часовий поділ каналу зв'язку)

UE - (мобільне обладнання)

WAP – Wireless Access Point (точка безпроводного доступу)

АБГШ – адитивний білий гаусівський шум

ГДК - гранично допустима концентрація

ЕМП - електромагнітне поле

КПО – коефіцієнт природного освітлення

МС – мобільна станція

ПК – персональний комп'ютер

РЗК - рекурсивний згортковий код

ЦП – циклічний префікс

ЦС – циклічний суфікс

ШПФ – швидке перетворення Фур'є

ВСТУП

Актуальність теми. Для будь-якої системи радіозв'язку можна виділити проблеми, що виникають при передачі сигналів по радіоінтерфейсу: згасання сигналу, тіньові зони, багатопроменеве поширення сигналів, завмирання сигналу, часові затримки. Зазначені проблеми проявляються практично в будь-якій системі радіозв'язку, у тому числі у стільниковому зв'язку та системах широкосмугового доступу Wi-Fi [1-4]. Вони є наслідком об'єктивних фізичних явищ, які не можуть бути подолані якимось впливом на них. Потрібні алгоритми та технології, які б забезпечили нормальне і ефективне функціонування радіосистем в умовах існування цих проблем. При цьому інфокомунікаційні системи вимагають від розробників запровадження таких методів боротьби з існуючими проблемами, які б враховували те, що в системах зв'язку передається трафік реального часу (голос), який не допускає тривалих затримок [5].

Найбільше різних алгоритмів боротьби з проблемами поширення сигналів було створено у стандарті GSM (Global System for Mobile Communications), оскільки це перша повністю цифрова система зв'язку. Більшість методів поліпшення якості сигналу, введені в даному стандарті, застосовуються і в наступних системах. Один з алгоритмів, який знайшов застосування в усіх (починаючи з 2G) поколіннях мобільного зв'язку, є interleaving (перемежування). Цей алгоритм також активно працює в стандартах широкосмугового доступу 802.11n/ac/ax – Wi-Fi 4, Wi-Fi 5, Wi-Fi 6.

Interleaving – це зміна за певним правилом порядку передачі символів для фактичного руйнування пакетів помилок (групових), викликаних завмираннями рівня сигналу. При перемежуванні кодове слово, що передається, формується з символів різних кодових слів. Тому при деперемежуванні пакет помилок трансформується на послідовність незалежних помилок, для виправлення яких, як правило, можна використовувати менш потужний код. Зі збільшенням глибини перемежування очікується поліпшення характеристик завадостійкості,

оскільки при цьому відбувається ослаблення кореляції помилок. Але при цьому зростає затримка у доставці повідомлення, пов'язана з виконанням процедур перемежування – деперемежування.

Інша потужна технологія, яка безальтернативно застосовується у згаданих стандартах, - це множинний доступ з ортогональним частотним розділенням OFDMA. Високі споживчі характеристики навіть у складних умовах роботи забезпечуються дуже вдалим технічними рішеннями, зокрема технологією OFDMA та алгоритмом interleaving [5-7]. Дослідження ефективності поєднання цих технічних рішень є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень. В процесі впровадження технології LTE були сформульовані основні вимоги до поколінь мобільного зв'язку 4G та 5G [5]. Ці вимоги обумовлювались наявністю нових типів послуг у додатках. Послуги передачі даних відіграватимуть важливішу роль, ніж передача голосу. Затребуваною стане високошвидкісна передача даних 100Мбіт/с і вище для випадку високої мобільності та високих швидкостей мобільного абонента. Підвищується актуальність надання асиметричних послуг передачі даних між висхідною та низхідною лініями передачі [6].

Для останніх версій стандарту Wi-Fi швидкість передачі даних збільшується за рахунок використання частотних ресурсів. Так, ширина каналу збільшувалася від 20 МГц у перших версіях до 160 МГц у 802.11ax. Кожна наступна версія відрізнялася від попередньої застосуванням вищого рівня позиційності модуляції, поступовим нарощуванням кількості потоків MIMO.

До новацій, які дозволяють безпроводним стандартам перейти на новий рівень і зараз продовжують досліджуватися, слід віднести поєднання таких алгоритмів та технологій: OFDMA, Interleaving, Resource Units, Target Wait Time (TWT), BSS coloring [4-6].

Мета та постановка задачі. Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є оцінка ефективності поєднання алгоритму interleaving та технології множинного доступу з ортогональним частотним розділенням у безпроводних мережах в умовах значних завад.

Задачами бакалаврської кваліфікаційної роботи є:

- аналіз умов роботи безпроводних систем та огляд стандартів з поєднанням технологій OFDMA та interleaving;
- аналіз структури каналів передачі систем LTE та Wi-Fi 6;
- оцінка ефективності алгоритму interleaving у стандартах LTE та Wi-Fi 6;
- оцінка ефективності технології OFDMA у стандартах LTE та Wi-Fi 6;
- енергетичні розрахунки низхідного та висхідного каналів передачі LTE;
- розрахунки показників з охорони праці.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на науковій конференції ВНТУ у 2025 році.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА УМОВ РОБОТИ БЕЗПРОВІДНИХ СИСТЕМ І ОГЛЯД СТАНДАРТІВ З ПОЄДНАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ OFDMA ТА INTERLEAVING

1.1 Огляд стандартів з поєднанням OFDMA та interleaving

Поєднання технології множинного доступу з ортогональним частотним розділенням (OFDMA) з алгоритмом зміни послідовності чередування даних (перемежування, interleaving) не варто вважати якимось оригінальним чи унікальним технічним прийомом. У безпроводних системах таке поєднання має на меті забезпечення надійної та ефективної роботи у складних заводових умовах, які неодмінно супроводжують їх роботу. Адаптація вибору ресурсних блоків до умов роботи системи у рамках технології OFDMA націлена на покращення параметрів сигналів і, як наслідок, на збільшення спектральної ефективності, тобто пропускної здатності каналів передачі. Interleaving є потужним методом боротьби з груповими помилками, які виникають в реальних умовах експлуатації систем [5].

Проаналізуємо коротко групу стандартів мобільного зв'язку та Wi-Fi, де передбачено поєднання зазначених технологій та визначимо, які з них доцільно більш глибоко розглянути у даній роботі.

Отже, поєднання алгоритму interleaving з технологією OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) або OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) активно використовується в сучасних безпроводних та стільникових стандартах. Ці технології разом дозволяють значно покращити надійність і ефективність передачі даних у складних умовах, таких як завади, багаторазове відбиття сигналу, шум та інші проблеми каналу.

1. Стандарт 4G LTE (Long Term Evolution). У цьому стандарті використовується технологія OFDMA для Downlink (передача даних від базової станції до мобільного пристрою), а SC-FDMA (Single Carrier FDMA) для Uplink (передача даних від мобільного пристрою до базової станції). Для підвищення

надійності зв'язку застосовується interleaving. Перемішування бітів дає змогу забезпечити більшу стійкість до короточасних завад, таких як сплески шуму або наслідки багатопроменевого поширення сигналів, які можуть негативно впливати на ефективність OFDM. Interleaving дозволяє зменшити ймовірність одночасної втрати кількох бітів у результаті дії завад, оскільки бітові потоки розподіляються по різних частотах, що підвищує стійкість до завад і покращує відновлення даних.

2. Wi-Fi стандарти: 802.11n (Wi-Fi 4), 802.11ac (Wi-Fi 5) та 802.11ax (Wi-Fi 6), активно застосовується OFDM для модуляції даних і OFDMA для доступу до частотного спектра. Для покращення стійкості сигналу та надійності передачі даних у цих мережах використовується interleaving. Це дозволяє зменшити ефект від короточасних завад і знизити ймовірність помилок через багатопроменеві ефекти (multipath fading), які є характерними для безпроводних мереж. Поєднання OFDM/OFDMA з interleaving дозволяє покращити використання спектра та зменшити ймовірність великої кількості помилок при прийомі даних, що підвищує пропускну здатність і стабільність зв'язку.

3. Стандарт WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) (IEEE 802.16) використовує технології OFDM і OFDMA для ефективного розподілу частотного спектра і забезпечення доступу до мережі множинним користувачам. Interleaving застосовується для покращення надійності передачі даних, щоб мінімізувати вплив завад та багатошляхових ефектів, що є частими в безпроводних каналах. Поєднання цих двох технологій дозволяє забезпечити стабільний зв'язок навіть у складних умовах середовища, зменшуючи кількість помилок, викликаних швидким зниженням якості каналу.

4. Стандарт 5G NR (New Radio). У стандарті 5G також використовуються технології OFDM для передачі даних у Downlink та OFDMA для доступу до частотного спектра для одночасної передачі даних від кількох користувачів. Interleaving в 5G застосовується для зменшення інтерференції та підвищення надійності зв'язку, що важливо в умовах високої щільності користувачів і використання високочастотних діапазонів (наприклад,

mmWave), де завади і ефекти багатопроменевого поширення сигналів можуть бути значними. Важливість поєднання OFDM/OFDMA та interleaving зростає через високу швидкість передачі даних і необхідність забезпечення стабільного з'єднання в умовах великих обсягів трафіку та високих вимог до якості обслуговування (QoS).

Доцільність поєднання interleaving з OFDM/OFDMA обґрунтовується його очевидними перевагами.

1. Покращення стійкості до завад.

OFDM є ефективним методом для роботи з багатошляховим каналом, проте він чутливий до завад, таких як сплески шуму або зміни каналів. Interleaving дозволяє «розкидати» дані по різних частотах і в часі, що допомагає зменшити ймовірність одночасного пошкодження кількох бітів. Поєднання OFDM/OFDMA з interleaving дозволяє зменшити вплив сплесків завад, оскільки помилки, викликані завадами, будуть розподілені на різні частоти або частини повідомлення.

2. Покращення ефективності відновлення даних.

Interleaving допомагає у випадку, коли дані не можуть бути успішно прийняті через завади. Вона дозволяє більш ефективно відновлювати втрачений чи пошкоджений сигнал. Наприклад, у разі сплеску шуму на конкретній частоті, переміщені біти будуть менш схильні до одночасних помилок, що зменшує ймовірність великих втрат даних.

3. Підвищення пропускної здатності.

OFDM/OFDMA дозволяє ефективно використовувати частотний спектр, розділяючи його на підканали для передачі даних одночасно декільком користувачам або потокам. Interleaving забезпечує більшу стійкість до помилок на цих підканалах, дозволяючи досягати кращої пропускної здатності при збереженні високої якості з'єднання.

4. Стабільність зв'язку в умовах високої щільності користувачів.

У мережах з високою щільністю користувачів (наприклад, в містах або на великих заходах) OFDMA дозволяє ефективно розподіляти ресурси серед

користувачів. Завдяки interleaving можна покращити стійкість до інтерференції і підтримувати стабільне з'єднання навіть при великій кількості одночасних користувачів.

Таким чином, поєднання interleaving з OFDM або OFDMA є важливою частиною багатьох сучасних безпроводних і стільникових стандартів, таких як LTE, Wi-Fi, WiMAX і 5G NR. Це поєднання дозволяє значно покращити стійкість до завад, зменшити помилки, підвищити пропускну здатність і забезпечити більш стабільний зв'язок, особливо в умовах високої щільності користувачів і складних умов середовища [6].

Подальші дослідження необхідно конкретизувати, тобто прив'язати їх до певних безпроводних систем, враховуючи той факт, що зазвичай має місце певна специфіка технічних та алгоритмічних рішень. Широке застосування в Україні знаходять стандарт мобільного зв'язку 4G LTE та стандарт Wi-Fi 6. Як щойно зазначалось, вони мають поєднання цих технологій, тому розгляд питань ефективності такого поєднання будемо проводити з прив'язкою до цих двох стандартів.

1.2 Типові проблеми при передачі радіосигналів

Безпроводний зв'язок забезпечує мобільність абонента, дозволяючи йому не залежати від конкретної географічної локації. Це стає можливим завдяки особливій структурі мережі доступу, де на фінальному відрізку до користувача замість провідного з'єднання використовується радіозв'язок. Однак сигнали радіозв'язку поширюються у неоднорідному середовищі та зазнають різноманітних перешкод під час передачі від базової станції (BTS) до мобільної станції (MS) або від точки доступу (AP) до користувача у випадку Wi-Fi.

Деякі з цих перешкод можна усунути шляхом збільшення потужності сигналу, тоді як інші вимагають складних алгоритмів обробки та додаткового обладнання. Основні проблеми, що виникають під час передачі сигналу через радіоінтерфейс, включають:

- загасання сигналу;
- наявність тіньових зон;
- багатопроменеве поширення;
- завмирання сигналу;
- часові затримки.

Деякі з цих явищ (наприклад, загасання сигналу та тіньові зони) є типовими для будь-якої системи радіозв'язку, і вже існують ефективні методи боротьби з ними. Водночас інші, такі як завмирання та багатопроменеве поширення, потребують нових технічних підходів. Додаткову складність створює передача трафіку реального часу, зокрема голосових даних, для яких критично важливим є мінімізація затримок. Еволюція стандартів безпроводного зв'язку сприяла розробці та впровадженню ефективних технологій, що забезпечують стабільну роботу навіть в умовах перерахованих перешкод.

1.2.1 Згасання сигналу

Незалежно від обраного способу передачі, початкова енергія сигналу, яка формується на виході передавача, поступово зменшується в процесі його поширення. Інакше кажучи, сигнал згасає. Основним негативним наслідком цього явища є ускладнення прийому: якщо рівень енергії сигналу на виході каналу зв'язку опуститься нижче порога чутливості приймача, він може бути прийнятий із помилками.

Причини згасання залежать від типу каналу зв'язку, але ключовим фактором є неідеальність середовища передачі.

У випадку радіоканалу згасання сигналу відбувається з кількох причин. Основною є розсіювання енергії у вигляді тепла, фактично, радіопередавач "обігриває" навколишній простір. Проте цей вид втрат є передбачуваним і лінійним, що дозволяє заздалегідь розрахувати необхідну потужність передавача для забезпечення зв'язку на заданій відстані.

Серйозну проблему для радіозв'язку створюють штучні об'єкти. Наприклад, стіни житлових будівель можуть значно ослаблювати сигнал

базової станції, що призводить до відсутності покриття всередині приміщення. Подібні перешкоди виникають як у стільниковому зв'язку, так і в мережах Wi-Fi.

Вирішення проблеми згасання сигналу потребує комплексного підходу, що включає як оптимізацію розташування базових станцій (точок доступу), так і вдосконалення мобільних пристроїв користувачів.

1.2.2 Тіньові зони

Коли сигнал від базової станції (BTS) стільникового зв'язку або точки доступу Wi-Fi поширюється, він стикається з різноманітними перешкодами як природного, так і штучного походження. До штучних перешкод належать будівлі, виробничі споруди, мости, меблі, стіни тощо. До природних – гори, пагорби, урвища, густі лісові масиви. Будь-який великий об'єкт або конструкція, що височіє над поверхнею землі, може стати бар'єром для сигналу.

Залежно від розміру та властивостей перешкоди можливі різні варіанти її впливу: сигнал може обійти об'єкт, утворити за ним зону з ослабленим покриттям (тіньову зону) або повністю зникнути.

Оскільки більшість таких перешкод відомі ще до розгортання мережі, планування враховує їх на етапі проєктування. Існує кілька підходів до вирішення цієї проблеми. Якщо тіньова зона охоплює значну територію з великою кількістю користувачів, доцільно встановити додаткову базову станцію, навіть у варіанті з малою ємністю. У випадку малонаселених зон більш раціональним рішенням є використання репітера (перевипромінювача), який ретранслює сигнал від іншої базової станції. Проте на практиці репітери мають обмежену ємність, не підлягають легкому масштабуванню та забирають ресурси від основної BTS, що робить їх встановлення не набагато дешевшим, ніж розгортання нової базової станції.

Розташування Wi-Fi-роутера вибирається так, щоб охопити якомога більшу активну зону. Якщо в приміщенні утворюються тіньові ділянки,

проблему можна вирішити за допомогою додаткових точок доступу або розширення мережі.

1.2.3 Багатопроменеве поширення сигналу

Під час поширення від джерела до приймача радіосигнал може стикатися з різноманітними перешкодами, які або поглинають його, або відбивають. Відбитий сигнал може згодом спрямовуватися назад у бік приймача, але з певною затримкою. Водночас частина сигналу може дійти до приймача без додаткових відбиттів, швидше за інші його копії, або навпаки – пройти кількаразове відбиття, що ще більше збільшить затримку.

Цей ефект виникає, коли між передавачем і приймачем формується кілька шляхів поширення сигналу [9]. У результаті енергія сигналу розподіляється нерівномірно між його копіями, що може призвести до ситуації, коли жодна з них не міститиме достатньої потужності для коректного прийому.

Проте багатопроменеве поширення сигналу має і позитивний аспект. Оскільки приймач отримує кілька копій сигналу, він може порівнювати їх, виявляти та навіть виправляти помилки, що виникли в процесі передачі. Цей принцип лежить в основі роботи Rake-приймача, що використовується в мобільних пристроях (UE) стандарту UMTS (Universal Mobile Telecommunications System).

Rake-приймач складається з кількох окремих приймачів, кожен із яких налаштовується на свою копію сигналу, визначає її часову затримку відносно інших і об'єднує їхню енергію. Завдяки цьому багатопроменеве поширення стає не перешкодою, а перевагою, дозволяючи зібрати копії сигналу з різних траєкторій та отримати стабільний і потужний вхідний сигнал.

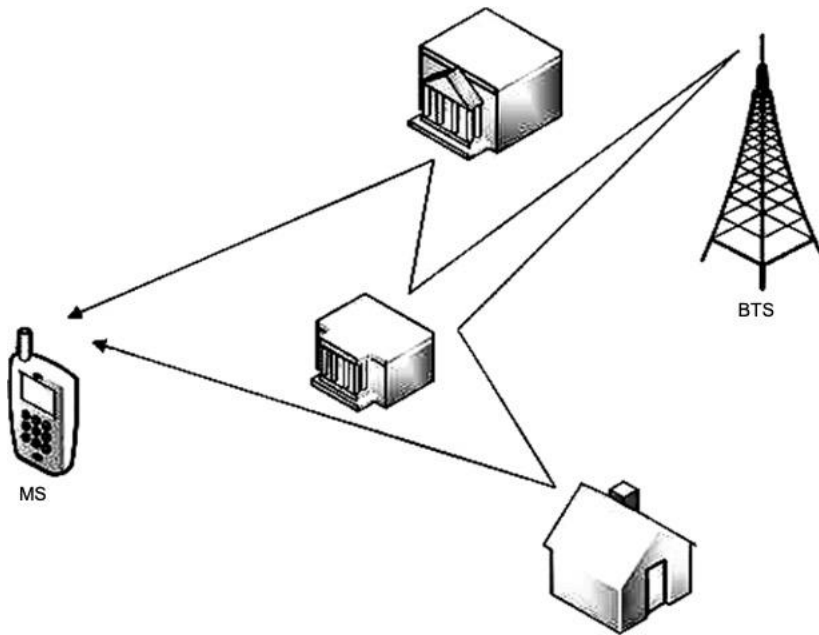


Рисунок 1.1 – Модель багатопроменевого поширення радіосигналу

У технології MIMO (Multiple Input Multiple Output) багатопроменеве поширення є ключовим елементом роботи приймачів. Її принцип полягає в тому, що інформаційний потік від одного передавача розподіляється між кількома антенами, а на приймальній стороні сигнал приймається відповідною кількістю приймачів. У результаті формується не один, а кілька незалежних каналів зв'язку, що підвищує ефективність передачі даних.

Оптимальна робота MIMO залежить від наявності різних шляхів поширення сигналу, оскільки це забезпечує кращу роздільність каналів. Практичні випробування показали, що в умовах мінімальної кількості перешкод між приймачами ефективність MIMO знижується, а загальна швидкість передачі даних виявляється меншою.

1.2.4 Завмирання сигналу

У безпроводних системах радіосигнал рідко поширюється прямолінійно, оскільки на його шляху зазвичай трапляються різні перешкоди, що спричиняють відбиття та зміну траєкторії. Як наслідок, до приймача може надходити не одна, а кілька копій вихідного сигналу, які мають часові затримки

та різні амплітуди. При цьому енергія сигналу розподіляється між цими копіями нерівномірно, що призводить до явища багатопроменевого поширення.

Зазвичай це не створює критичних проблем, оскільки існують ефективні методи компенсації, наприклад, Rake-приймач [8]. Проте в окремих випадках дві копії сигналу можуть досягти приймача у протифазі, коли їх затримка становить половину періоду сигналу або його кратне значення. У такій ситуації хвилі можуть взаємно компенсувати одна одну, що призведе до часткового чи повного зникнення сигналу.

Якщо ці хвилі містили значну частину енергії вихідного сигналу, це може викликати збільшення рівня помилок і погіршення якості зв'язку. Таке явище називається "завмиранням" сигналу, коли зв'язок між передавачем і приймачем тимчасово втрачається. Фізичні механізми цього процесу проілюстровані на рисунку 1.2.

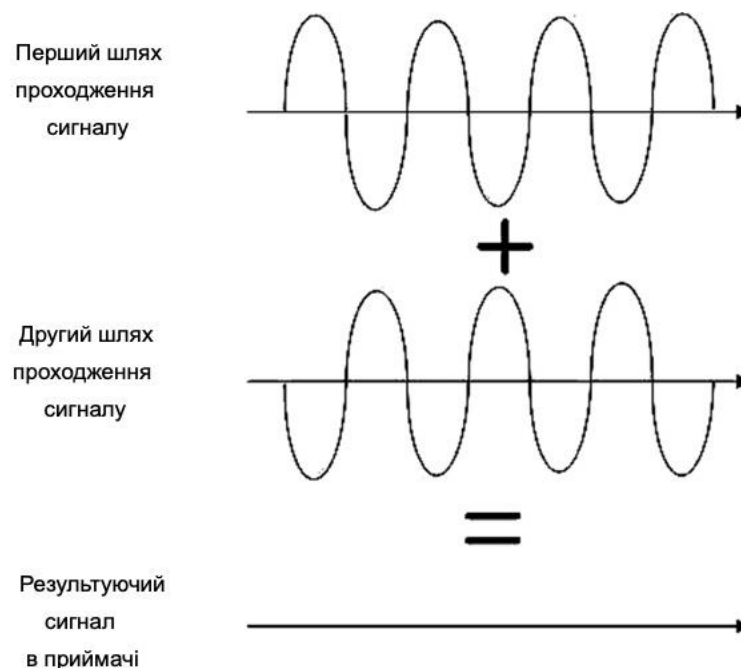


Рисунок 1.2 – Протифазне додавання двох копій сигналу

Залежно від природи виникнення та впливу на сигнал виділяють два основні типи завмирань: повільні та швидкі.

Повільні завмирання зазвичай спричинені несприятливими погодними умовами або повільними змінами в навколишньому середовищі, наприклад, для Wi-Fi. На сьогодні розроблено ефективні методи компенсації цього явища.

Швидкі завмирання виникають переважно через рух приймача або передавача, а також через наявність перешкод поблизу приймача. Вони мають частотно-селективний характер, тобто зміна частоти передачі сигналу може значно зменшити їхній вплив або навіть повністю усунути.

Отже, завмирання сигналу є однією з ключових проблем безпроводного зв'язку. Однак завдяки багаторічним дослідженням і розвитку технологій наразі існують ефективні рішення для їхнього усунення.

1.3 Методи розв'язання проблем

Сучасні безпроводні системи зв'язку використовують різноманітні методи для компенсації впливу несприятливих умов поширення сигналів. Деякі з цих підходів також застосовуються в провідних мережах, наприклад, завадостійке кодування. Однак низка проблем, характерних саме для безпроводного зв'язку, потребувала розробки унікальних рішень, які вперше були впроваджені саме в безпроводних технологіях.

Серед найбільш значущих методів слід виділити:

- перемежування (Interleaving);
- ортогональне частотне розділення (OFDMA);
- рознесений прийом (Antenna Diversity);
- перескоки по частоті (Frequency Hopping);
- адаптивну корекцію (Adaptive Equalization);
- завадостійке кодування;
- управління потужністю.

Ці технології суттєво покращують якість безпроводного зв'язку, мінімізуючи вплив перешкод та завмирань сигналу.

1.3.1 Перемежування (interleaving)

Радіосигнал, що передається через ефір, піддається впливу різноманітних завад, зокрема промислових шумів, атмосферних явищ (наприклад, грозових розрядів) та випромінювання побутових приладів. Внаслідок цього помилки у переданих даних зазвичай виникають не поодинці, а групами, що означає збої у кількох бітів поспіль. Головна проблема таких завад полягає в тому, що стандартні механізми корекції помилок, як правило, можуть виправляти лише одиничні похибки, тоді як групові помилки залишаються невиявленими, що погіршує якість зв'язку [9].

Існують спеціальні коди, здатні коригувати пакетні помилки, проте на практиці частіше використовують більш ефективний метод – перемежування (Interleaving). Його суть полягає у зміні порядку бітів перед передачею, щоб випадкові групові помилки не концентрувалися в одному місці. Наприклад, замість послідовного передавання «1, 2, 3, 4, 5, 6...» застосовується переставлена послідовність «5, 3, 6, 1, 4, 2...». При цьому одна й та сама схема перемежування накладається циклічно на весь цифровий потік. Після прийому сигналу відбувається зворотна перестановка бітів, що дозволяє корекційним алгоритмам виправити помилки, які раніше могли залишитися нерозпізнаними.

Ефективність перемежування залежить від довжини оброблюваного сигналу:

- Якщо обробляється короткий фрагмент, система може справлятися лише з дрібними груповими помилками.
- Якщо ж перемежування охоплює тривалий часовий інтервал, стійкість до завад зростає, але це потребує більше ресурсів та може викликати затримки у передачі сигналу.

На практиці знаходять баланс між тривалістю перемежування та затримками, вибираючи достатньо довгі кадри для ефективного захисту від групових помилок у радіоефірі. Рисунок 1.3 ілюструє принцип роботи процедури перемежування.



Рисунок 1.3 – Приклад дії перемежування на практиці

Насправді часто застосовують багаторівневе перемежування. Спочатку виконується первинна перестановка бітів, після чого отримані кадри об'єднуються у більший блок, який проходить додатковий етап перемежування. Така багатоступенева схема значно підвищує захист сигналу, дозволяючи ефективно усувати навіть тривалі помилки в каналі зв'язку.

Окрім підвищення надійності передачі даних, перемежування також сприяє покращенню завадостійкості каналу зв'язку. Оскільки схеми перестановки бітів можуть змінюватися з часом, це створює додаткові труднощі для потенційного злоумисника, ускладнюючи виділення корисного сигналу. Для його розшифровки потрібно значно більше обчислювальних ресурсів та часу, що підвищує рівень захисту інформації.

1.3.2 Рознесений прийом (Antenna Diversity)

Одним із найсерйозніших негативних явищ у процесі передачі радіосигналу є його завмирання. Під час поширення від передавача до приймача сигнал може багаторазово відбиватися від різних перешкод, у результаті чого до приймача надходять кілька копій одного і того ж сигналу. Якщо одна з копій виявиться у протифазі з основним сигналом, тобто буде

відставати на половину періоду (1,5; 2,5 і т. д.), вони можуть взаємно послабити або навіть повністю загасити один одного. Це призведе до втрати енергії сигналу, що, у свою чергу, викличе помилки в прийомі даних. Крім того, на сигнал можуть впливати різні завади та спотворення, а також ефект згасання, через який рівень прийнятого сигналу може виявитися нижчим за поріг чутливості приймача, що спричинить його неправильне розпізнавання або повну втрату.

Один із способів боротьби із цими проблемами – використання кількох копій сигналу на приймальному боці. Існують різні методи отримання таких копій. Наприклад, повторна передача забезпечує часове рознесення, а використання різних частот – частотне рознесення. Однак ці методи вимагають додаткових ресурсів. У безпроводному зв'язку застосовуються ефективніші та економічніші підходи – просторове та поляризаційне рознесення.

Просторове рознесення реалізується шляхом встановлення кількох приймальних антен на базовій станції (або точці доступу). Антени можуть бути розташовані вертикально або горизонтально, проте горизонтальне рознесення є більш практичним, оскільки потребує меншої відстані між антенами. Кожна з антен підключається до окремого електричного кола, а приймачі базової станції оцінюють отримані сигнали, що значно зменшує ймовірність одночасного замирання сигналу на обох антенах. Крім того, це дозволяє збільшити сумарну прийняту енергію корисного сигналу.

Поляризаційне рознесення базується на тому, що радіосигнал може змінювати свою поляризацію через відбиття та неоднорідність середовища. У результаті приймач отримує кілька копій сигналу з різною поляризацією. Щоб ефективно збирати енергію з усіх можливих напрямків, у приймальній антені розміщують два приймальні елементи, розташовані під кутом 90° один до одного. Це дозволяє компенсувати втрати енергії сигналу та зменшити ефект згасання, покращуючи якість зв'язку.

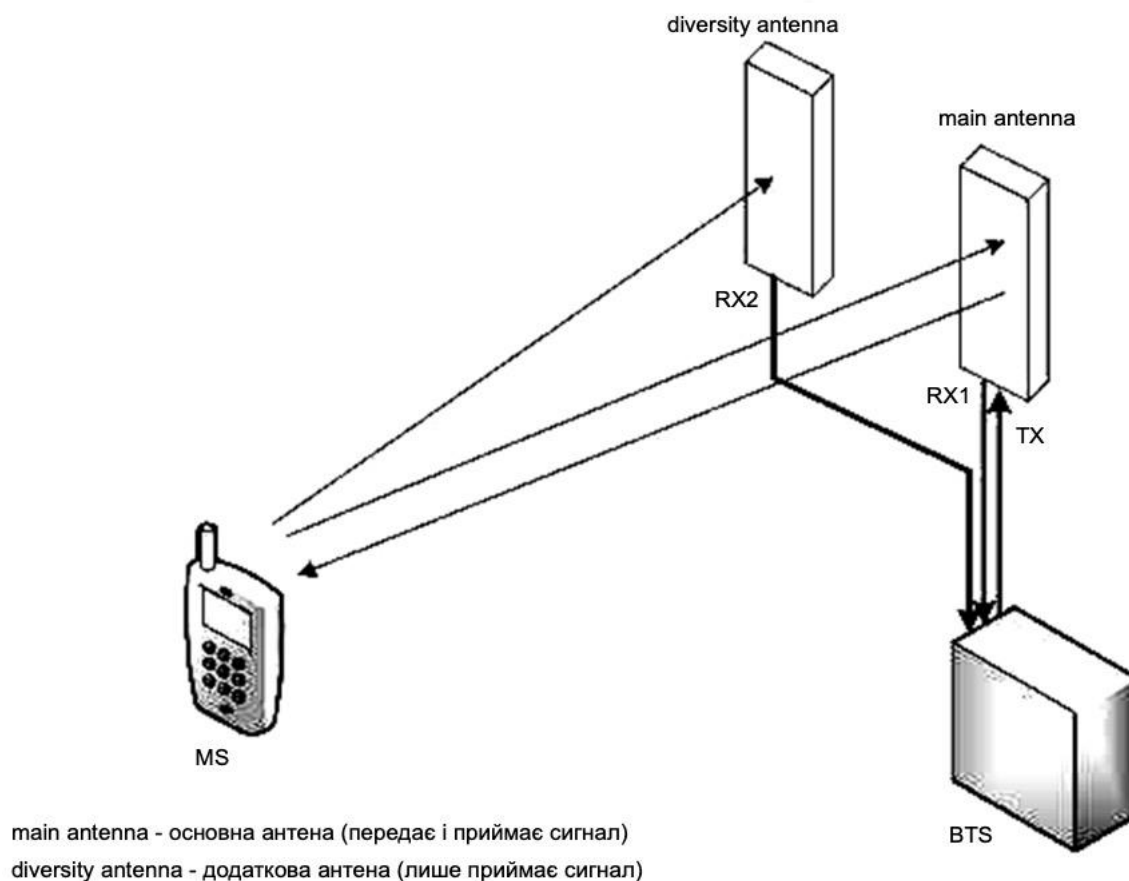


Рисунок 1.4 – Принцип рознесеного прийому

1.3.3 Адаптивна корекція (Adaptive Equalization)

Під час передачі сигналу через радіоз'єднання на нього впливають різні види завад: промислові, побутові, атмосферні, а також перешкоди від інших систем зв'язку чи навмисні спотворення. Часто ці чинники накладаються один на одного, створюючи сумарний вплив на корисний сигнал. У результаті спостерігаються постійні зміни завад за потужністю, фазою, частотою та шириною спектра. Для компенсації цих негативних ефектів необхідний спеціальний механізм. Просте регулювання потужності сигналу не є достатньо ефективним, оскільки зміни відбуваються швидше, ніж можна їх виміряти та внести коригування.

У безпроводних системах зв'язку для боротьби з такими швидкими змінами завад використовується адаптивна корекція. Її принцип полягає в тому, що

разом із корисним сигналом передається тестова послідовність (*training sequence*), заздалегідь відома як передавачу, так і приймачу. Оскільки тестова послідовність піддається тим самим спотворенням, що й корисний сигнал, приймач отримує своєрідний «зліпок» поточного стану каналу зв'язку. На основі цієї інформації можна внести необхідні коригування для покращення прийому сигналу.

Основним недоліком цього методу є необхідність передавання додаткової інформації, що збільшує загальне навантаження на канал. Крім того, приймач потребує додаткових обчислювальних ресурсів для обробки отриманих даних. Втім, сучасне телекомунікаційне обладнання має достатню продуктивність для виконання таких процедур без суттєвого впливу на швидкість обміну даними. Ще один недолік полягає в тому, що аналіз каналу здійснюється лише під час передавання тестової послідовності, а отримані дані дають лише приблизне уявлення про стан каналу в інший час. Однак практика показує, що навіть вибіркове тестування забезпечує достатню точність оцінки завад, що робить цей метод ефективним і широко застосовуваним у сучасних стандартах безпроводного зв'язку.

1.3.4 Завадостійке кодування

Захист від помилок у безпроводних системах зв'язку можна розділити на три основні етапи: попередження, виявлення та виправлення помилок. Методи інтерлівінгу, адаптивної корекції та Antenna Diversity спрямовані передусім на запобігання виникненню помилок. Вони дозволяють ефективно протидіяти завадам, згасанню сигналу та іншим негативним факторам. Однак повністю усунути помилки неможливо, тому необхідні додаткові механізми їхнього виявлення та виправлення.

Для цього застосовується завадостійке кодування, яке передбачає додавання до цифрового потоку надлишкової інформації. Воно зазвичай поділяється на два етапи: виявлення та виправлення помилок.

Виявлення помилок здійснюється за допомогою методів контролю, зокрема циклічного надлишкового коду (CRC, Cyclic Redundancy Check). Цей метод полягає в обчисленні контрольної суми для блоку даних і передаванні її разом із корисною інформацією. Кількість контрольних бітів залежить від важливості та швидкості передачі даних: що вищі ці параметри, то більше бітів використовується. У різних стандартах можуть застосовуватися й інші алгоритми контролю помилок.

Виправлення помилок здійснюється за допомогою спеціальних кодів, таких як згорткові та блокові коди. Їхнє завдання – додати до інформації додаткові біти, які дають змогу відновити вихідний сигнал або його частину у разі помилки. Залежно від стандарту та рівня важливості передаваних даних, обсяг додаткової інформації може змінюватися, іноді збільшуючи загальний розмір переданих даних у два-три рази.

Завадостійке кодування є останньою лінією захисту від завад, тому до нього висуваються високі вимоги щодо надійності. Його конкретна реалізація залежить від стандарту зв'язку, покоління технології та використовуваних методів передачі даних. У деяких випадках може впроваджуватися більша надмірність або додаткові коди, але загальна мета залишається незмінною — забезпечення якісного зв'язку навіть за складних умов.

1.3.5 Управління потужністю (Power control)

Переданий сигнал випромінюється з кінцевою потужністю і поступово згасає в навколишньому просторі. Найбільш очевидний спосіб боротьби з даними явищами - це збільшення потужності сигналу, що передається. Однак цей процес не такий простий, як може здатися на перший погляд.

Головна складність полягає в тому, що в одній і тій же системі працюють відразу кілька джерел та приймачів сигналу, які розташовані близько один до одного. Необдумане збільшення потужності одного з передавачів може призвести до зниження якості та обриву з'єднань інших абонентів та неможливості доступу нових. Крім того, у першу чергу абонентські пристрої

мають обмежені енергетичні ресурси. Загальний принцип управління демонструє рисунок 1.5.

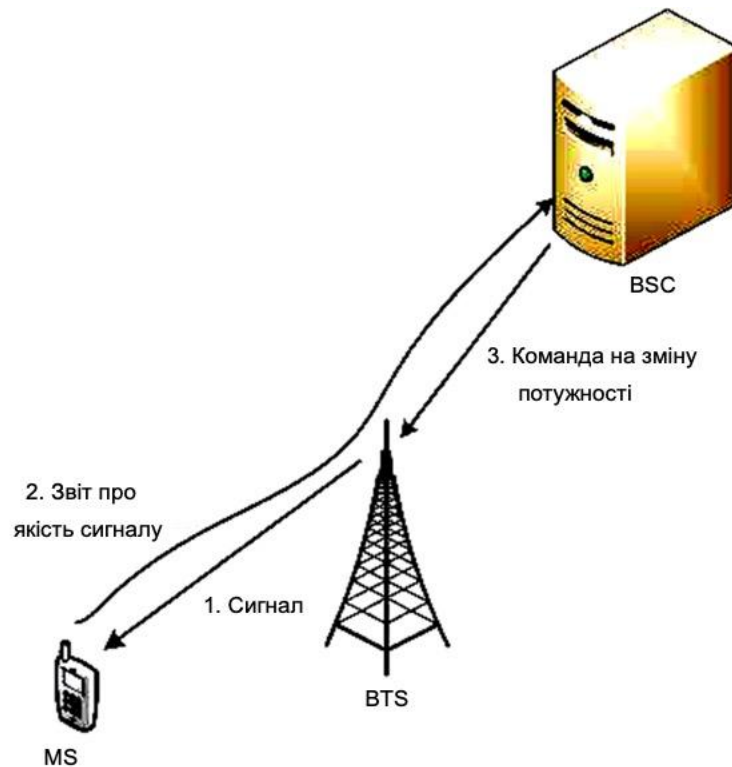


Рисунок 1.5 – Принцип управління потужністю у мережі стільникового зв'язку

Надмірна випромінювана потужність може спричинити швидке розрядження акумулятора абонентських пристроїв та значні витрати електроенергії для базових станцій (BTS). Крім того, не варто забувати про можливий небажаний вплив мікрохвильового випромінювання на організм людини.

У різних стандартах зв'язку управління потужністю реалізується по-різному. Загалом це ключовий і відповідальний процес у стільникових мережах, який впливає на якість з'єднання, кількість одночасно обслуговуваних абонентів, рівень електромагнітного впливу та навіть на вартість послуг.

1.4 Висновки до розділу

Алгоритм interleaving у поєднанні з технологією OFDMA відіграє ключову роль у безпроводних інфокомунікаційних системах. Вони підвищують стійкість сигналу до завад, особливо тих, що спричиняють групові помилки. Це поєднання широко застосовується в сучасних стандартах безпроводного зв'язку, оскільки значно покращує надійність та ефективність передачі даних навіть у складних умовах, таких як завади, багатопроменеве поширення, шум та висока щільність користувачів. Серед різних методів покращення функціонування безпроводного зв'язку комбінація interleaving і OFDMA має визначальне значення.

2 СТРУКТУРА КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ СИСТЕМ LTE ТА Wi-Fi 6

2.1 Загальна характеристика каналів передачі

Поєднання алгоритму interleaving та технології множинного доступу з ортогональним частотним розділенням (OFDMA) застосовується в багатьох сучасних стандартах безпроводного зв'язку, що вже було відзначено у попередньому розділі. Аналіз ефективності цього тандему надалі здійснюватиметься на основі двох ключових стандартів: LTE, який представляє стільниковий зв'язок, та Wi-Fi 6 (802.11ax), що належить до широкосмугового радіодоступу.

У стандарті Wi-Fi 6 (802.11ax) поєднання interleaving та OFDMA реалізоване в обох каналах передачі: Downlink (від точки доступу до користувачького пристрою) та Uplink (від користувачького пристрою до точки доступу). Це пояснюється тим, що OFDMA у цьому стандарті використовується для обох напрямків передачі. Натомість у стандарті LTE OFDMA застосовується лише в Downlink, тоді як для Uplink використовується технологія SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) — множинний доступ з частотним поділом на основі єдиної несійної частоти.

На рисунку 2.1 зображено структурну схему каналу Uplink у LTE. Відповідно до неї, передавач SC-FDMA містить додатковий блок прямого швидкого перетворення Фур'є перед блоком розподілу ресурсних елементів. Такий підхід дозволяє групувати символи разом, що сприяє зменшенню пікових значень сигналу (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR).

Оскільки в LTE Uplink застосовується SC-FDMA, мобільний пристрій використовує лише частину піднесійних у спектрі Uplink, оскільки решта зайнята іншими користувачами. При цьому виділений для кожного терміналу ресурсний блок складається із суміжних піднесійних без розривів між ними. Такий підхід дозволяє утримувати піковий фактор у допустимих межах, що

сприяє більшій ефективності енергоспоживання та зменшенню впливу нелінійних спотворень.

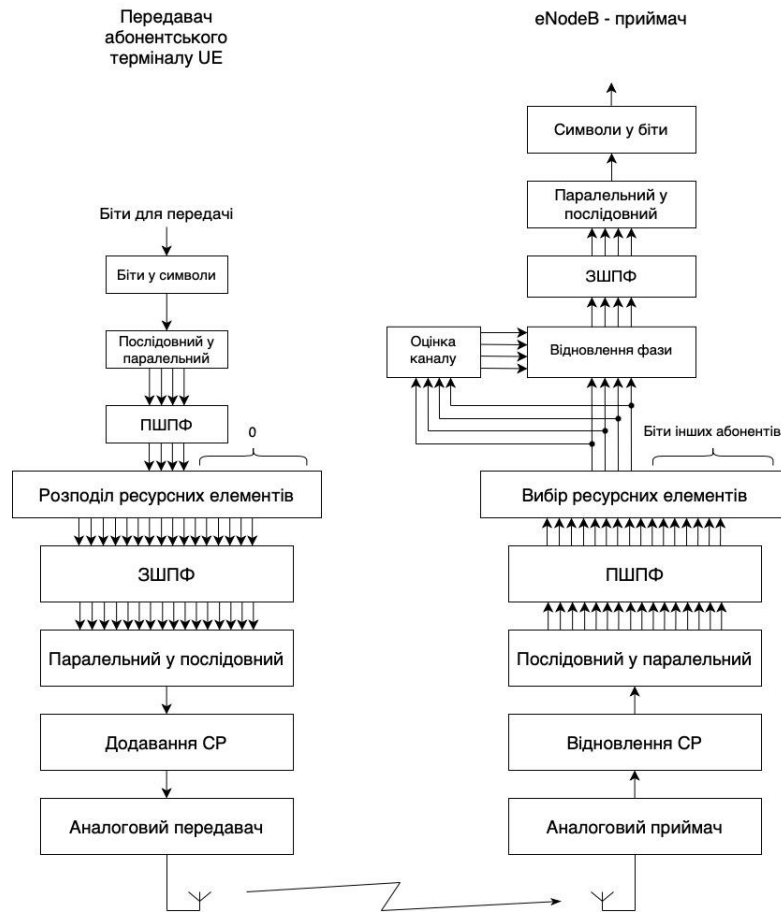


Рисунок 2.1 – Структурна схема каналу передачі Uplink для LTE

Після виконання швидкого зворотного перетворення Фур'є (ЗШПФ) модульовані потоки об'єднуються та перетворюються назад у часову область. Незважаючи на те, що передача даних від різних пристроїв у мережі відбувається одночасно в одній і тій самій смузі частот, на приймальній стороні після виконання зазначених процедур можна виділити окремі інформаційні потоки від кожного eUE.

Використання технології SC-FDMA у LTE Uplink дозволило збільшити спектральну ефективність у три рази порівняно з мережами 3G. Оскільки канал передачі даних від мобільного пристрою до базової станції не використовує

OFDMA, його подальший розгляд у контексті цього дослідження не проводитиметься.

2.2 Узагальнена структура каналу з OFDMA

На рисунку 2.2 представлено структурну схему каналу передачі у системі безпроводного зв'язку, де передбачено використання технології OFDMA та алгоритму interleaving (перемежування). Це узагальнена схема, яка застосовується як у стандарті LTE, так і у Wi-Fi 6.

Зокрема, в LTE дана схема відповідає каналу Downlink (передача даних від базової станції до мобільного пристрою), тоді як у Wi-Fi 6 вона охоплює обидва канали зв'язку – як Downlink, так і Uplink (передача даних у зворотному напрямку, від пристрою до точки доступу).

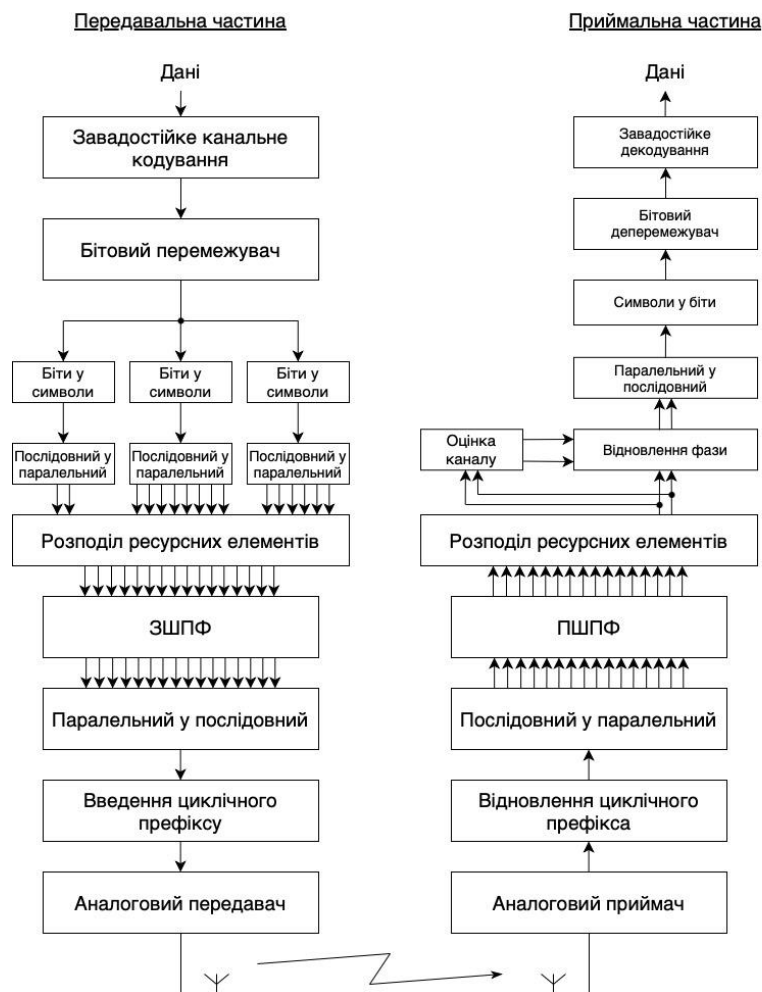


Рисунок 2.2 - Структурна схема каналу передачі системи безпроводного зв'язку

Вхідний цифровий потік спрямовується до вузлів канального кодування – методу, що забезпечує надійну передачу даних від джерела до пункту призначення, зменшуючи ймовірність помилок і спрощуючи розрізнення окремих повідомлень. Канальний кодер приймає двійкові дані та формує вихідний сигнал.

Правильний вибір коду для конкретного телекомунікаційного каналу дозволяє декодеру відновлювати вихідні дані навіть у разі спотворення сигналу через шуми та завади. За наявності достовірної інформації про характеристики каналу, застосування канального кодування підвищує пропускну здатність і зменшує енергоспоживання, забезпечуючи енергетичний вигаш. Крім того, використання кодування знижує загальну частоту помилкових бітів порівняно з некодованими системами при однаковому рівні енерговитрат на передавання даних.

У LTE для завадостійкого кодування зазвичай застосовуються турбокоди, тоді як у Wi-Fi 6 використовують код перевірки парності з низькою щільністю (LDPC).

Після кодування виконується перемежування (interleaving) – процедура змішування бітів, яка підвищує стійкість сигналу до групових помилок. Довший кадр перемежування забезпечує ефективний захист від завад у радіоефірі, хоча й потребує складніших алгоритмів і додає затримки в передачі даних.

У багатьох системах застосовують кілька рівнів інтерлівінгу. Після первинного перемежування формується другий рівень, де кілька початкових кадрів проходять повторну процедуру. У LTE використовується бітово-символьний інтерлівінг, тоді як у Wi-Fi 6 – бітово-частотний, що передбачає два рівні перестановки. Така схема забезпечує високий захист сигналу та дозволяє уникнути практично всіх групових помилок у каналі зв'язку.

Після проходження бітового перемежування інформаційні потоки спрямовуються на подальші обробки. На рисунку 2.2 представлено процес передачі даних до трьох різних абонентських терміналів. Кожен бітовий потік

модулюється незалежно, з використанням різних схем модуляції для кожного терміналу.

Далі кожен потік перетворюється з послідовного коду в паралельний, що дозволяє розподілити його між піднесійними частотами. Кількість піднесійних, виділених для кожного абонента, визначається необхідною пропускною здатністю для надання запитуваних сервісів. Наприклад, для голосового зв'язку може бути достатньо кількох піднесійних, тоді як відеотрансляції потребують значно ширшого частотного ресурсу.

Далі планувальник ресурсних елементів отримує закодовані бітові потоки для кожного абонента та визначає піднесійні, які будуть використані для їхньої передачі. Обрані піднесійні можуть бути суміжними або розподіленими по різних ресурсних блоках. Після цього розраховуються фаза та рівень сигналу для кожної піднесійної як функції частоти.

На наступному етапі проводиться зворотне швидке перетворення Фур'є (IFFT), у результаті чого отримують часові квадратурні компоненти сигналу. Потім додається циклічний префікс, а отриманий сигнал накладається на несійну частоту для передачі в аналоговій формі.

Зворотний процес в абонентському терміналі.

Абонентський пристрій виконує зворотні операції для прийому даних. Спочатку він аналізує сигнал, фільтрує його, а потім відновлює циклічний префікс. Після цього виконується пряме швидке перетворення Фур'є (FFT), що дозволяє відновити амплітуду та фазу кожної піднесійної. Далі мобільний термінал оцінює стан каналу, коригує фазу та відновлює передані біти, які передаються на вищі рівні моделі OSI.

Загальна стратегія LTE та Wi-Fi 6.

Процес перетворень у каналі передачі LTE та Wi-Fi 6 є однаковим:

1. Канальне кодування
2. Перемежування (interleaving)
3. Модуляція
4. Розподіл по ресурсних блоках

5. Випромінення сигналу

Основна різниця полягає у використанні відмінних алгоритмів для реалізації цих процедур. У наступних розділах буде розглянуто їх детальніше.

2.2.1 Канальне кодування

У стандарті LTE основним методом корекції помилок є турбокод, тоді як у Wi-Fi 6 застосовується код перевірки парності з низькою щільністю (LDPC).

Турбокод – це поєднання двох рекурсивних згорткових кодів (РЗК1, РЗК2), кожен з яких використовує обмежену кількість станів. Ці згорткові коди формують блокову структуру, в якій для l -інформаційних бітів кожен компонент коду створює набір бітів парності. У підсумку турбокод складається з інформаційних бітів і додаткових бітів парності, що забезпечує ефективну корекцію помилок.

Структурна схема телекомунікаційного каналу, що використовує турбокоди, наведена на рис. 2.3.

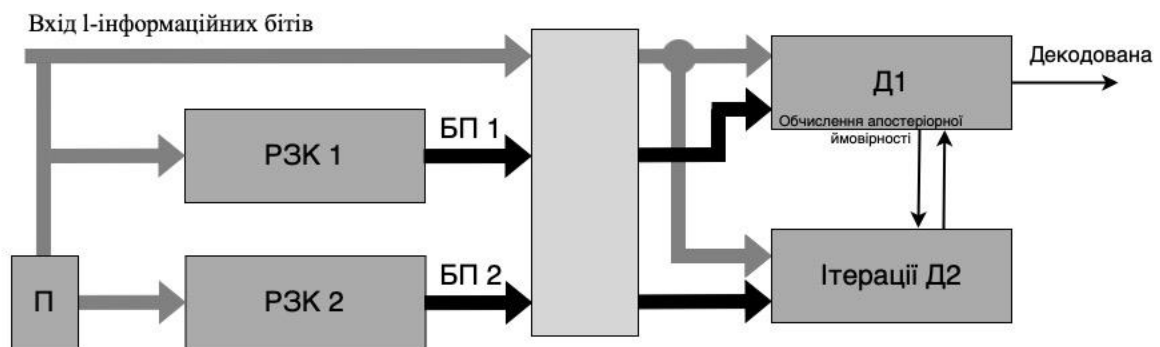


Рисунок 2.3 – Структурна схема каналу на основі турбокодів

Вхідні дані надходять на другий рекурсивний згортковий код (РЗК2) через перемешувач (П). Ефективність кодування значною мірою залежить від правильного вибору типу перемешувача, оскільки він виконує скремблювання вхідних даних, утворюючи псевдовипадкову послідовність. Це дозволяє розподілити помилки, що виникають у першому коді (РЗК1), таким чином, щоб

вони не концентрувалися в одному місці, а рівномірно розсіювалися у другому коді (РЗК2).

Для турбодекодування використовуються два прості декодери, які обмінюються оцінками правдоподібності декодованих бітів. Кожен декодер приймає отримані від іншого оцінки як апіорну ймовірність і використовує їх для покращення результату. Ці декодери застосовують побітовий алгоритм декодування, що має таку саму складність, як і алгоритм Вітербі [6,7].

Щоб досягти задовільної збіжності при декодуванні, між двома декодерами виконується ітераційна процедура. У підсумку отримується «жорстка» оцінка правдоподібності.

Зрештою, паралельне комбінування двох кодів із відповідними швидкостями R_1 і R_2 формує результуючу швидкість, що визначає загальну ефективність турбокоду.

$$R_p = \frac{R_1 \cdot R_2}{1 - (1 - R_1)(1 - R_2)}. \quad (2.1)$$

Ця швидкість вища, ніж у послідовно з'єднаного коду, коли

$$R_s = R_1 \cdot R_2. \quad (2.2)$$

Чим менші значення R_1 і R_2 , тим більша різниця у цих швидкостях.

Код перевірки парності з низькою щільністю (LDPC) — це лінійний код з виправленням помилок, що належить до класу блокових кодів фіксованої довжини n . Його кодові символи повинні задовольняти r рівнянь перевірки парності, які мають вигляд: $x_a \oplus x_b \oplus x_c \oplus \dots \oplus x_z = 0$, де $\oplus$ означає додавання за модулем 2, а $x_a, x_b, x_c, \dots, x_z$ — це кодові символи у рівнянні.

Кожне кодове слово довжиною n містить $n - r = k$ інформаційних цифр і r контрольних цифр. Матриця перевірки парності — це двійкова матриця розміром $r \times n$, де рядки представляють рівняння перевірки парності, а стовпці

— кодові символи. В елементі (i, j) цієї матриці стоїть «1», якщо i -й біт коду використовується в j -му рівнянні [10].

Особливістю LDPC-коду є низька щільність одиниць у матриці перевірки парності. Регулярний LDPC-код побудований так, що кожен біт коду входить в однакову кількість рівнянь, а кожне рівняння містить рівну кількість кодових символів. Нерегулярний LDPC-код послаблює ці обмеження, що дозволяє гнучкіше налаштовувати кодові характеристики.

Процес кодування:

1. Біти вхідних даних повторюються та розподіляються між наборами складових кодерів.
2. Складові кодери (зазвичай реалізовані у вигляді накопичувачів) генерують паритетні біти.
3. Частина бітів від кожного складового кодера відкидається.
4. Результуючий код містить інформаційні біти та біти парності, які формують кодове слово.

Код LDPC використовує велику кількість паралельно працюючих згорткових кодів низької глибини (зазвичай 2 стани), які пов'язані між собою операціями повторення та розподілу. Ці операції виконують функцію перемежувача, аналогічну тій, що застосовується в турбокодах.

Декодування LDPC.

У практичній реалізації LDPC-декодера декодування виконується паралельно для значного збільшення пропускну здатності та ефективності роботи коду.

2.2.2 Первинний рівень інтерлівінгу

Під час передачі інформації можуть виникати помилки, які поділяються на однократні, двократні та пакетні (групові). Однократні та двократні помилки легко виправляються за допомогою завадостійких кодів. Однак, якщо імпульсні перешкоди спотворюють 10–15 бітів поспіль, утворюючи пакетні помилки, звичайні коригувальні коди не можуть їх виправити.

Для таких випадків був розроблений спеціальний клас кодів — коди Ріда-Соломона (Reed-Solomon, R-S code), які дозволяють коригувати групові помилки. Однак реалізація кодера та декодера для цих кодів є доволі складною. Тому додатково застосовують перемежування, яке є простим методом розбиття пакетної помилки на окремі групи, що значно підвищує ефективність виправлення помилок.

Принцип роботи перемежування

Перемежування здійснюється на виході FEC-кодера в передавачі, а деперемежування — у приймачі перед декодером (див. рис. 2.2). Суть методу полягає у зміні порядку передавання бітів через канал зв'язку. Тобто біти, сформовані кодером, надсилаються не в тому порядку, в якому були утворені, а за заздалегідь визначеною схемою.

У процесі передачі ця змінена послідовність може бути спотворена груповими помилками через особливості каналу зв'язку. Однак на приймальній стороні біти переставляються назад, відновлюючи початкову послідовність. Завдяки цьому пакетна помилка розбивається на дрібніші групи помилок, що підвищує ймовірність їх успішного виправлення завадостійкими кодами. Деперемежування виконує функцію "розсіювання" пакетних помилок по всьому оброблюваному блоку даних, що робить їх статистично квазізалежними.

Види перемежувачів

Перемежувачі поділяються на дві основні категорії:

1. Блокові перемежувачі
2. Згорткові перемежувачі

Принцип роботи блокового перемежувача та деперемежувача наведено на рис. 2.4.

У блоковому перемежувачі біти, що надходять із кодера, записуються у двовимірну матрицю за певним алгоритмом. Найпростішим способом є послідовний запис рядками. Після заповнення всієї матриці починається етап зчитування, який здійснюється в іншому порядку, зазвичай по стовпцях.

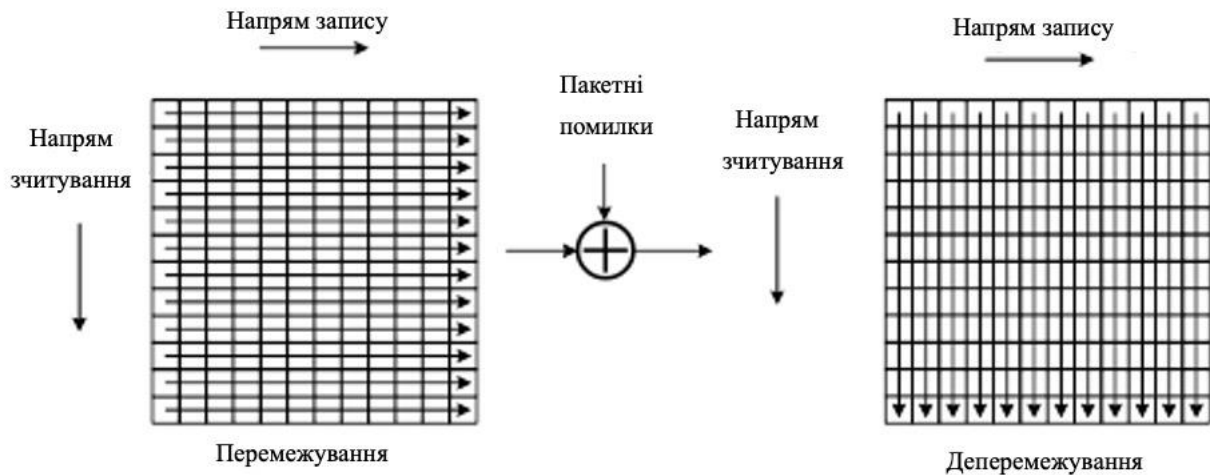


Рисунок 2.4 – Принцип блочного перемежування та деперемежування

Робота блокового перемежувача та деперемежувача

На стороні приймача біти також зберігаються в аналогічній двовимірній матриці в тому ж порядку, в якому вони були зчитані передавачем. Після повного заповнення матриці прийняті біти зчитуються в тому ж порядку, в якому вони були записані в передавачі.

Запис рядками та зчитування стовпцями є одним із найпростіших способів розсіювання пакетних помилок. Проте можливо використовувати й інші схеми запису та зчитування, за умови, що вони будуть комплементарними, тобто взаємно узгодженими.

Важливими параметрами перемежувача є:

- Розмір матриці, який визначає глибину перемежування. Його підбирають так, щоб групові помилки після деперемежування виглядали випадковими, полегшуючи їх виправлення.
- Послідовність адрес запису та зчитування, яка повинна бути узгоджена між передавачем і приймачем.

Необхідність синхронізації

Для коректної роботи перемежувача та деперемежувача необхідна синхронізація. Якщо часові рамки зчитування передавача та приймача будуть зсунуті, порядок бітів на виході з деперемежувача буде неправильним.

Щоб уникнути цієї проблеми, передача даних часто починається з короткого синхронізуючого слова.

Оскільки процеси запису та зчитування відбуваються одночасно, зазвичай використовують дві матриці:

- Одна зберігає нові вхідні біти
 - Інша — використовується для зчитування раніше записаних даних
- Після завершення запису/зчитування їхні функції змінюються місцями.

Глибина перемежування та її вплив

Здатність розсіювати пакетні помилки залежить від глибини перемежування, тобто розміру матриці:

- Збільшення розмірів матриці підвищує ефективність боротьби з груповими помилками
- Однак це вимагає більшого обсягу пам'яті та точнішої синхронізації
- При збільшенні глибини перемежування покращується завадостійкість, оскільки зменшується кореляція помилок
- Водночас зростає латентність передачі, оскільки процеси перемежування-деперемежування додають затримку

Перспективним напрямком досліджень є використання матриць змінного розміру та розробка оптимальних алгоритмів запису/зчитування бітів.

2.2.3 Interleaving у стандарті LTE

Алгоритм interleaving (перемішування) є важливим компонентом у стільникових комунікаційних системах, що використовується для покращення стійкості сигналу до помилок, зокрема до сплесків шуму чи завад, які можуть виникати під час передачі даних. Алгоритм interleaving дозволяє розподіляти дані в певному порядку, щоб зменшити ймовірність одночасної втрати декількох сусідніх бітів через завади. Алгоритм interleaving у стандарті LTE є незмінним атрибутом, але його параметри можуть змінюватися залежно від модуляції, швидкості передачі та умов функціонування каналу. Процедура перемежування (перший рівень) виконується після турбокодування перед

модуляцією, яка може бути різною залежно від рівня завад - QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM. Основна мета – зробити сигнал більш стійким до згасань (fading) і групових помилок (burst errors).

Структура (глибина) interleaving залежить від типу модуляції та режиму роботи. Якщо у каналі передачі низьке співвідношення SNR (сигнал/шум), то використовується найбільш завадостійкий вид модуляції - QPSK і найменша глибина (рівень) interleaving. Для багатопозиційних видів модуляції 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM – складніший алгоритм interleaving, оскільки вищі рівні модуляції більш чутливі до завад. Стосовно режимів роботи каналу передачі - в гарних умовах (високий SNR) – використовується інтерлівер меншої глибини, в поганих умовах (низький SNR, багатопроменеве поширення) – параметри можуть змінюватися для покращення корекції помилок. Окрім так званого бітового інтерлівінгу, який виконується у стандарті LTE після турбокодування, використовується додатково другий його рівень – символний інтерлівінг. Він виконується після модуляції (QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM) і полягає у тому, що сусідні символи передаються через різні частотні піднесійні, щоб уникнути втрати всієї інформації в разі загасання частини спектра. Мова йде про технологію OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), де передбачено специфічні схеми перемішування, які допомагають знизити ймовірність великих помилок, що можуть виникнути внаслідок частотних завад.

Таким чином, LTE зосереджений на стійкості до багатопроменевого поширення та групових помилок, використовуючи символний та бітовий інтерлівер. Обидва його рівні реалізуються перед розподілом ресурсних блоків. В абонентському пристрої (UE) виконується декодування та деінтерліверування отриманого сигналу. Крім цього, відбувається аналіз якості каналу (CQI) для зворотного зв'язку з базовою станцією eNB. Абонентський пристрій, як зазначалось вище, використовує технологію множинного доступу SC-FDMA в uplink, що зменшує складність інтерліверування.

2.2.4 Interleaving у стандарті Wi-Fi 6

У Wi-Fi 6 (802.11ax) процес передачі даних подібний до LTE. Першим етапом є кодування та Interleaving. Переважно застосовується LDPC-кодування та бітовий інтерлівінг, що допомагає розподілити бітові помилки. Далі - модуляція (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 1024-QAM) та розподіл ресурсів в OFDMA: дані розбиваються на ресурсні блоки Resource Units (RU), що складаються з піднесійних, і кожному клієнту може бути виділена різна кількість RU. Передача здійснюється через OFDMA - ресурсні блоки призначаються користувачам одночасно. Інтерлівер виконується до формування ресурсних блоків OFDMA, тому це незалежні етапи. Однак, як і в LTE, interleaving покращує стійкість сигналу перед його модуляцією та розподілом у частотному ресурсі. Interleaving у Wi-Fi 6 також виконується завжди, але його алгоритм змінюється в залежності від типу модуляції та умов роботи каналу. Працює після LDPC-кодування (або BCC-кодування в деяких випадках) і перед модуляцією (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 1024-QAM). Основна мета — зробити передачу стійкішою до інтерференції та згасань, особливо в середовищах із великою кількістю пристроїв. Параметри interleaving у Wi-Fi 6 залежать від модуляційної схеми, типу каналного кодування та умов роботи. Мінімальна глибина бітового interleaving використовується для низьких модуляцій (BPSK, QPSK). Для 1024-QAM – складний інтерлівер, оскільки цей вид модуляції характеризується низькою завадостійкістю, тому потрібен захист від помилок. Якщо має місце каналне кодування LDPC, використовується покращений interleaving, адаптований для високих швидкостей; для коду BCC (Binary Convolutional Code), що використовується рідше, стандарт має простіший інтерлівер. В умовах високого рівня шуму та завад Wi-Fi 6 може адаптувати інтерлівер для покращення завадостійкості.

Можна сформулювати особливості реалізації interleaving у Wi-Fi 6.

Як і у стандарті LTE, він має два рівні. Бітовий interleaving виконується після LDPC або BCC-кодування і запобігає накопиченню бітових помилок у середовищі зі значним рівнем шуму. Другий рівень (частотний interleaving)

інтегрований в технологію OFDMA. Символи передаються на різних піднесійних у каналі OFDMA (тобто вони не групуються на сусідніх піднесійних, а розносяться по всьому спектру). При цьому використовується спеціальний перестановочний індекс (π) для визначення порядку переданих символів. Для цього стандарту характерне адаптивне налаштування - якщо використовується BCC-кодування, застосовується простий інтерлівер, якщо використовується LDPC-кодування, інтерлівер складніший, щоб забезпечити кращий захист від помилок. У Wi-Fi 6 можна використовувати канали з різною шириною смуги: 20/40/80/160 МГц, і алгоритм interleaving масштабується залежно від ширини каналу. Основний акцент робиться на гнучкому розподілі символів між піднесійними для зменшення впливу завад у перевантажених мережах.

Отже, у підсумку для стандарту Wi-Fi 6 можна зазначити такі параметри реалізації алгоритму interleaving.

У точці доступу (AP, роутер) виконується бітовий і частотний interleaving після LDPC або BCC-кодування. Стандарт підтримує модуляційні схеми BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 1024-QAM, які вибираються залежно від стану каналу передачі. В процесі OFDMA рмінюється порядок переданих символів за рахунок частотного розподілу (другий рівень інтерлівінгу). Має місце гнучка схема interleaving залежно від ширини каналу (20/40/80/160 МГц).

В абонентських пристроях (STA, смартфон, ноутбук) відбувається декодування інтерліверованого сигналу після демодуляції та відновлюється правильний порядок бітів і символів. На відміну від LTE абонентський пристрій Wi-Fi 6 працює з OFDMA у напрямку uplink, що забезпечує більш рівномірний розподіл ресурсів. Ключова відмінність: LTE застосовує бітовий та символний interleaving, орієнтований на стійкість до fading, а Wi-Fi 6 використовує бітовий та частотний interleaving, оптимізований для роботи в багатокористувацькому середовищі (з великою щільністю користувачів).

Основні відмінності в реалізації interleaving у LTE та Wi-Fi 6 наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Основні відмінності interleaving у LTE та Wi-Fi 6

Характеристика	LTE	Wi-Fi 6
Тип кодування	Turbo-коди (3GPP) або LDPC	LDPC або BCC (Binary Convolutional Code)
Рівень реалізації	Виконується на рівні фізичного каналу (PHY) перед модуляцією	Виконується на рівні фізичного каналу (PHY) перед модуляцією
Алгоритм interleaving	Бітовий + символний інтерлівер	Бітовий + частотний інтерлівер
Залежність від модуляції	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 1024-QAM
Головна мета	Мінімізувати ефекти багатопроменевого поширення (fading)	Стійкість до завад у середовищах із багатьма користувачами
Гнучкість	Фіксований алгоритм у кожному режимі	Адаптивний, залежно від модуляції та ширини каналу
Призначення ресурсів	Динамічний розподіл ресурсних блоків (RB)	Гнучкий розподіл ресурсних одиниць (RU) в OFDMA

2.3 Висновки до розділу

Проведено аналіз побудови низхідного каналу передачі (Downlink) стандарту стільникового зв'язку LTE та низхідного і висхідного каналів передачі (Downlink, Uplink) стандарту широкосмугового радіодоступу Wi-Fi 6, у яких має місце поєднання алгоритму interleaving і технології OFDMA.

В передавачах обох стандартів формування вихідного сигналу відбувається за подібними схемами: каналне кодування, перший рівень інтерлівінгу, модуляція, другий рівень інтерлівінгу, розподіл по ресурсних блоках, OFDMA, випромінення.

Дана коротка характеристика каналних кодів (турбокод, LDPC), які переважно використовуються у стандартах LTE та Wi-Fi 6. Розглянуто принцип блочного перемежування бітів цифрового потоку, показано особливості реалізації інтерлівінгу в обох стандартах, у тому числі і його другого рівня – символного та частотного.

Interleaving у LTE та Wi-Fi 6 реалізований дещо по-різному, оскільки ці технології працюють у різних середовищах: в LTE алгоритм зосереджений на стійкості до багатопроменевого поширення (fading), використовуючи символний та бітовий інтерлівер; у Wi-Fi 6 він оптимізований для роботи в перевантажених мережах, застосовуючи бітовий та частотний інтерлівер з адаптацією до ширини каналу. Таким чином в LTE має місце бітовий і часовий розподіл символів для покращення зв'язку на великих відстанях, а у Wi-Fi 6 – гнучкий бітовий та частотний розподіл для зменшення завад у локальних мережах.

3 ТЕХНОЛОГІЯ OFDMA У СТАНДАРТАХ LTE ТА Wi-Fi 6

3.1 Технологія OFDM

Однією з найпоширеніших технологій модуляції є ортогональне частотне мультимплексування (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Ця технологія широко використовується у мережах 4G, LTE, WiMAX, а також у стандартах Wi-Fi.

Основна ідея OFDM полягає в тому, що для досягнення високої швидкості передачі весь доступний частотний діапазон розділяється на велику кількість вузькосмугових підканалів (піднесійних), які передають дані паралельно. Кожен із цих підканалів модулюється окремим символом, після чого відбувається частотне мультимплексування, і дані передаються через ортогональні піднесійні.

Переваги OFDM перед традиційними методами модуляції

На відміну від систем передачі з однією несійною, OFDM забезпечує:

- Високу стійкість до вузькосмугових перешкод та спотворень каналу зв'язку.
- Гнучкість у налаштуванні параметрів передачі: для кожної піднесійної можуть незалежно обиратися параметри модуляції, такі як розмір сигнального сузір'я та швидкість кодування.

OFDM у багатопроменевому середовищі

Замість класичного підходу, що базується на передачі сигналу через одну несійну, OFDM дозволяє ефективно передавати дані в умовах багатопроменевого поширення, навіть якщо затримки сигналу перевищують тривалість символу. У такому випадку вся доступна смуга частот ділиться на набір еквідистантних вузькосмугових підканалів, що передаються паралельно.

Роль каналного кодування в OFDM

Використання сучасних технологій каналного кодування відіграє ключову роль у підвищенні ефективності систем, що базуються на OFDM,

дозволяючи підвищити завадостійкість і мінімізувати вплив спотворень у каналі зв'язку.

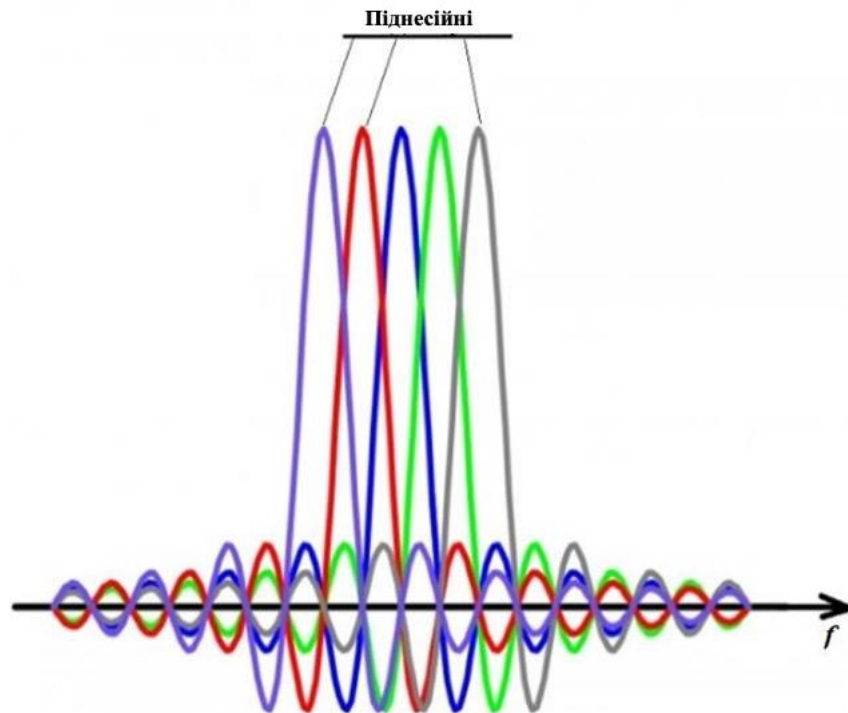


Рисунок 3.1 – Розміщення піднесійних у частотній області при формуванні сигналів OFDM

Представимо сигнали OFDM основної смуги пропускання так [6]:

$$u_l(t) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{T_{CM}} \sum_{l=0}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^{N-1} U_l(k) Y_{l,k}(t) \right] \right\}, \quad (3.1)$$

де $Y_{l,k}(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k(t-lT_{CM})}, & 0 < t \leq T_{CM} \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases}$ – l -й сигнал на k -й піднесійній; $T_{CM} =$

$T_C N$ – часовий інтервал передачі N символів, який обумовлений процедурою послідовно-паралельного перетворення.

Або:

$$u_l(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} U_l(k) e^{j2\pi f_k(t-lT_{CM})}. \quad (3.2)$$

Після дискретизації неперервного сигналу (3.2) отримаємо

$$u_l(n) = \sum_{k=0}^{N-1} U_l(k) e^{j2\pi kn/N} \text{ для } n=0, 1, \dots, N-1, \quad (3.3)$$

де $t = lT_{CM} + nT_c$; $T_c = T_{CM}/N$; $f_k = k/T_{CM}$.

Зазначимо, що у рівнянні (3.3) використовується N -точкове зворотне перетворення Фур'є для багатопозиційної фазової (ФМ) та амплітудної (АМ) модуляції символів, які містять дані $\{U_l[k]\}_{k=0}^{N-1}$, для обчислення яких можна застосувати алгоритм швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

Таким чином, якщо математично описати передані в каналі символи як $s_l(t) = \sum_{k=0}^{N-1} U_l(k) e^{j2\pi f_k(t-lT_{CM})}$, то внаслідок ортогональності піднесійних їх можна відновити наступним чином:

$$\begin{aligned} S_l[k] &= \frac{1}{T_{CM}} \int_{-\infty}^{\infty} s_l(t) e^{-j2\pi f_k(t-lT_{CM})} dt = \\ &= \frac{1}{T_{CM}} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} U_l(i) e^{j2\pi f_i(t-lT_{CM})} \right\} e^{-j2\pi f_k(t-lT_{CM})} dt = \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} U_l(i) \left\{ \frac{1}{T_{CM}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi(f_i-f_k)(t-lT_{CM})} dt \right\} = U_l[k] \end{aligned} \quad (3.4)$$

Відповідно до представлених математичних моделей, процес формування та обробки сигналів у OFDM можна подати у вигляді блок-схеми (рис. 3.2).

На цій схемі символи $U_l[k]$ використовуються для модуляції піднесійних частот $f_k = k/T_{CM}$ (на рисунку показано приклад для $N = 6$). В демодуляторі обробка сигналу здійснюється на основі правил ортогональності. Один символ OFDM складається з N паралельних символів, а його загальна тривалість становить $T_{CM} = T_c N$.

- Модуляція піднесійних частот у передавачі реалізується за допомогою зворотного швидкого перетворення Фур'є (IFFT).
- Демодуляція на приймальній стороні здійснюється через пряме швидке перетворення Фур'є (FFT).

Головна перевага OFDM у багатопроменевих каналах – це протидія міжсимвольній інтерференції (ISI), що досягається оптимізацією тривалості

імпульсної послідовності. Отже, маємо високу стійкість до завмирань сигналу, спричинених багатопроменевим поширенням та ефективне використання частотного ресурсу завдяки можливості адаптивного регулювання потужності та обсягу переданих даних.

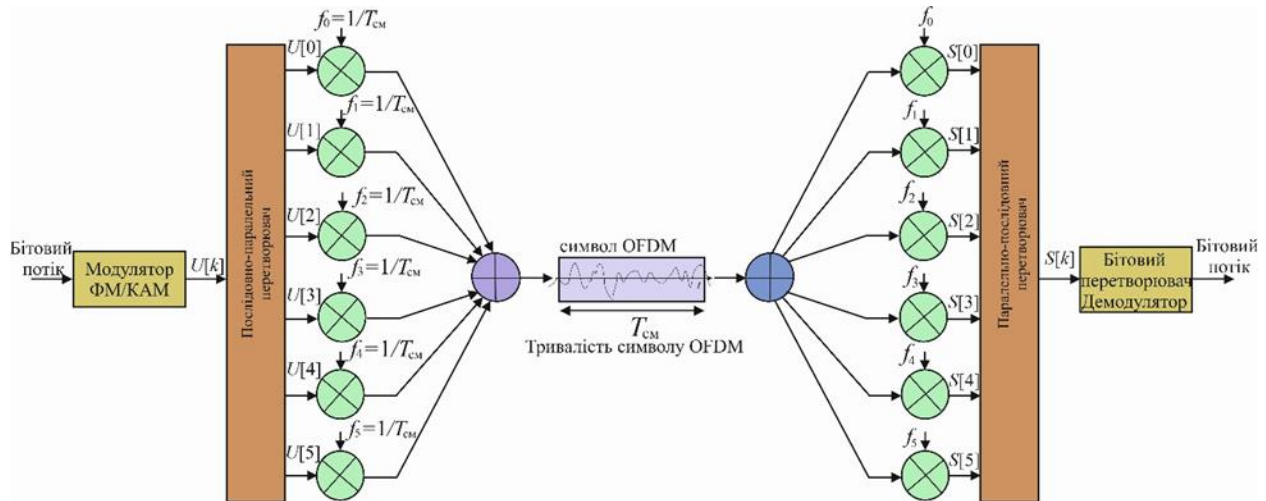


Рисунок 3.2 – Структурна схема формування та обробки сигналів у системі OFDM

Розглянемо основні принципи формування захисного інтервалу в структурі OFDM-сигналу. Існують два основні методи його реалізації: нульове заповнення (НЗ) – додається до структури OFDM-сигналу спеціальним доповненням з нулями і циклічний префікс (ЦП) – сигнал розширюється шляхом додавання копії його останньої частини на початок (рис. 3.3).

На рис. 3.4 проілюстровано вплив міжсимвольної інтерференції (ISI) на окремі піднесійні OFDM-сигналу.

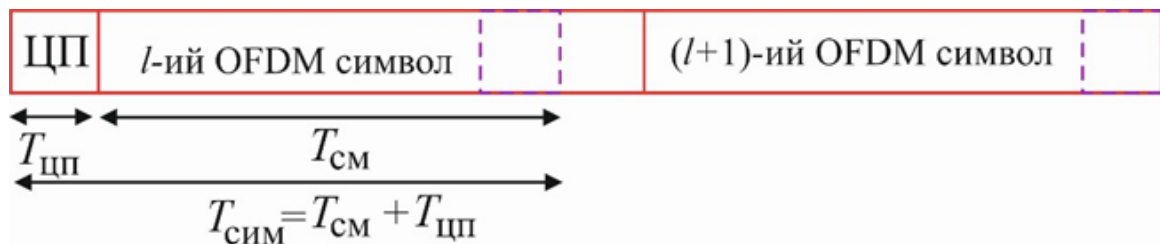


Рисунок 3.3 – Структура OFDM-сигналу із захисним інтервалом

Задача ЦП полягає у розширенні OFDM-сигналу шляхом копіювання останніх відліків сигналу до початкової частини конструкції. Якщо позначити тривалість ЦП у відліках як $T_{\text{цп}}$, то розширену тривалість конструкції символів OFDM можна представити як: $T_{\text{сим}} = T_{\text{см}} + T_{\text{цп}}$ (рис. 3.3 та 3.4).

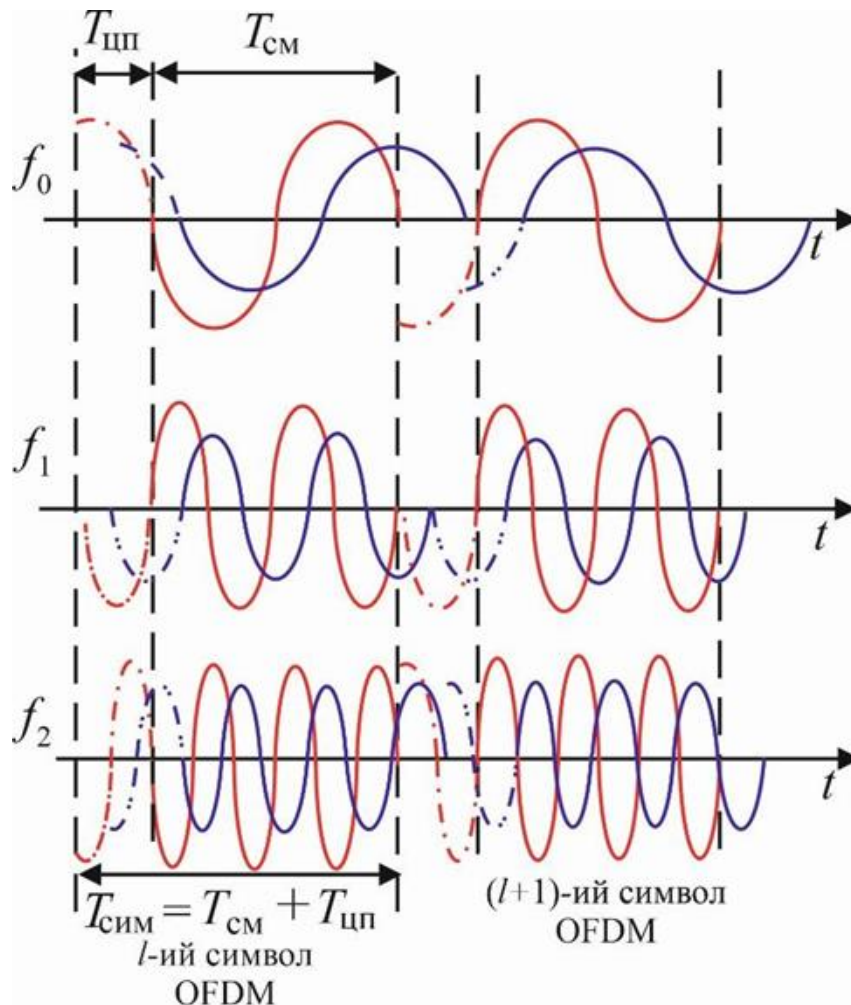


Рисунок 3.4 - Ілюстрація впливу ефекту міжсимвольної інтерференції для кожної піднесійної OFDM сигналу

На рис. 3.4 показано вплив міжсимвольної інтерференції (ISI) на окремі піднесійні OFDM-символу через багатопроменеве поширення сигналів. Видно, що якщо тривалість циклічного префіксу (ЦП) дорівнює або перевищує максимальну затримку у багатопроменевому каналі, то ISI між сусідніми

символами обмежується лише захисним інтервалом (цей ефект на рис. 3.4 позначено пунктирними лініями).

Таким чином, за умови правильно вибраного захисного інтервалу, вплив одного символу на інший не заважає виконанню Швидкого Перетворення Фур'є (ШПФ) для наступного OFDM-символу з тривалістю $T_{\text{см}}$. Це дозволяє зберігати ортогональність між піднесійними, оскільки затримані піднесійні залишаються неперервними завдяки наявності ЦП, а їх взаємна ортогональність зберігається протягом $T_{\text{см}}$.

Однак можливе зміщення символів, спричинене помилками символної синхронізації. Це може призвести до перекриття заголовка OFDM-символу та початкової точки вікна ШПФ. Якщо початкова точка ШПФ розташована раніше кінця попереднього символу, виникає міжсимвольна інтерференція (ISI). Якщо ж вона зміщена пізніше початку символу, можливі як ISI, так і міжчастотна інтерференція (ICI) (у тому числі між піднесійними), що проілюстровано на рис. 3.5.

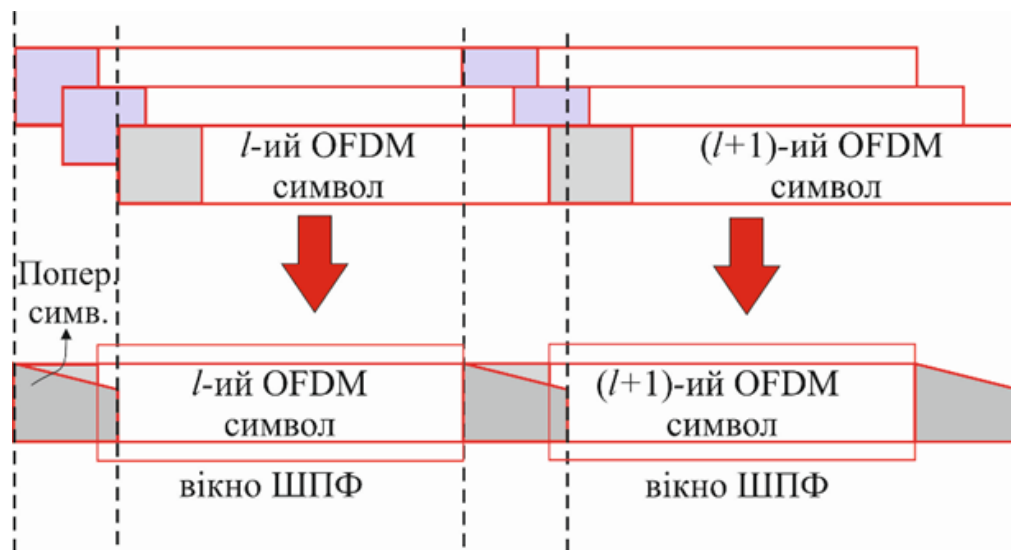


Рисунок 3.5 - Міжсимвольна інтерференція в OFDM з довжиною циклічного префіксу, коротшою за максимальну затримку в каналі

Формування OFDM-сигналу для широкосмугових систем може передбачати використання захисного інтервалу із нульовим заповненням (НЗ).

На рис. 3.5 продемонстровано структуру OFDM-символів із НЗ та їхню взаємодію з міжсимвольною інтерференцією (ISI) на рівні піднесійних частот. Через затримку в багатопроменевому каналі виникають розриви у вікні Швидкого Перетворення Фур'є (ШПФ), що впливає на ефективну довжину символів. Щоб мінімізувати ISI та міжчастотну інтерференцію (ICI), частина захисного інтервалу наступного OFDM-символу k копіюється та додається до його заголовка.

Оскільки захисний інтервал (НЗ) складається з нульових значень, фактична тривалість OFDM-символу у цьому випадку є коротшою порівняно з OFDM-символами, що використовують циклічний префікс (ЦП) і циклічний суфікс (ЦС). Це також впливає на довжину прямокутного вікна під час передачі, яка стає меншою.

Важлива особливість OFDM-символу з НЗ — нижчий рівень позасмугової пульсації у порівнянні з традиційною конструкцією OFDM-символу, що показано на рис. 3.5. Водночас позасмугова потужність у такій схемі є вищою, що сприяє збільшенню переданої потужності сигналу.

На рис. 3.6 наведено результати моделювання завадостійкості OFDM-каналу в умовах міжсимвольної інтерференції, що демонструє ефективність різних методів обробки сигналу.

На графіках рис. 3.6 представлено такі випадки:

- 1 – Аналітична крива для адитивного білого гаусівського шуму (АБГШ).
- 2 – Аналітична крива для Релеєвського каналу.
- 3 – АБГШ без використання захисного інтервалу.
- 4 – Канал із циклічним префіксом (ЦП) довжиною 16 символів.
- 5 – Канал із захисним інтервалом на основі нульового заповнення (НЗ) довжиною 16 символів.

У дослідженні аналізувався вплив довжини захисного інтервалу на завадостійкість сигналу, зокрема для інтервалів, що містять ЦП, ЦС або НЗ.

Методика дослідження передбачала:

- Використання 64-точкового Швидкого Перетворення Фур'є (ШПФ).

- Резервування 16 віртуальних піднесійних.
- Модуляцію 16-QAM (КАМ-16).

Аналіз проводився для двох типів каналів:

- АБГШ.
- Канал із Релеєвським завмиранням, де максимальна затримка становила до 15 символів.

На рис. 3.6 для всіх випадків було обрано захисний інтервал довжиною 16 символів, що дозволило оцінити його ефективність у різних сценаріях передачі.

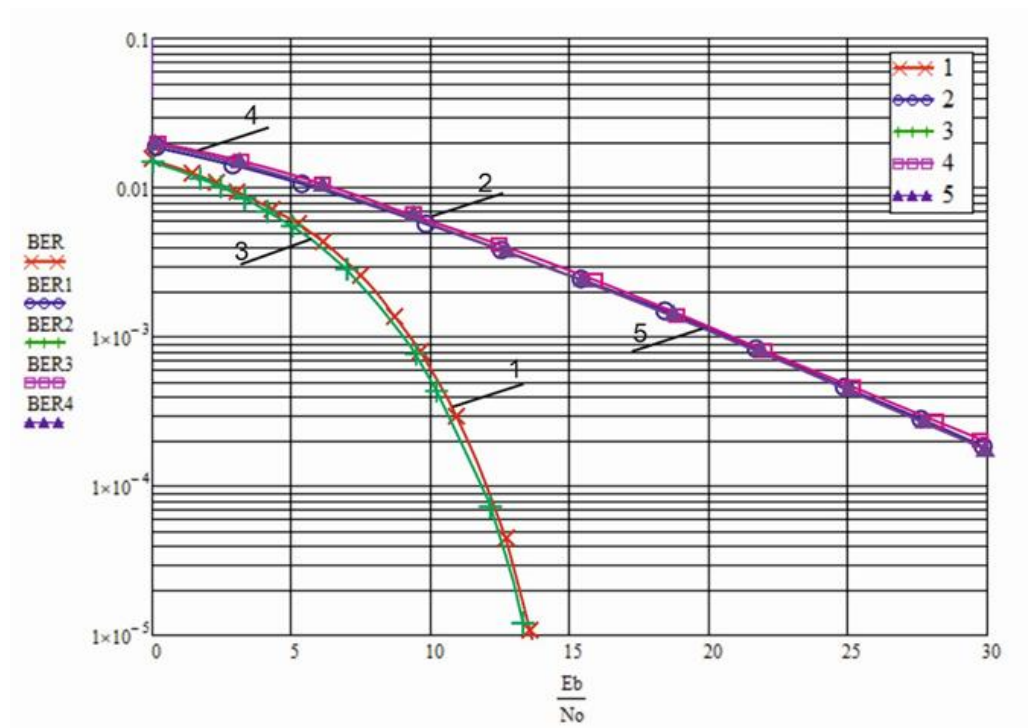


Рисунок 3.6 - Графік завадостійкості каналу з OFDM та довжиною захисного інтервалу у 16 символів

Графічні залежності на рис. 3.7 дозволяють оцінити вплив довжини захисного інтервалу на завадостійкість каналу.

На графіках, рис. 3.7, позначено: 1 – АБГШ – аналітична крива; 2 – Релеєвський канал - аналітична крива; 3 – АБГШ – випадок без захисного інтервалу; 4 - для каналу з ЦП, який дорівнює 3 символи; 5 - для каналу з НЗ, яке вибиралось довжиною 3 символи.

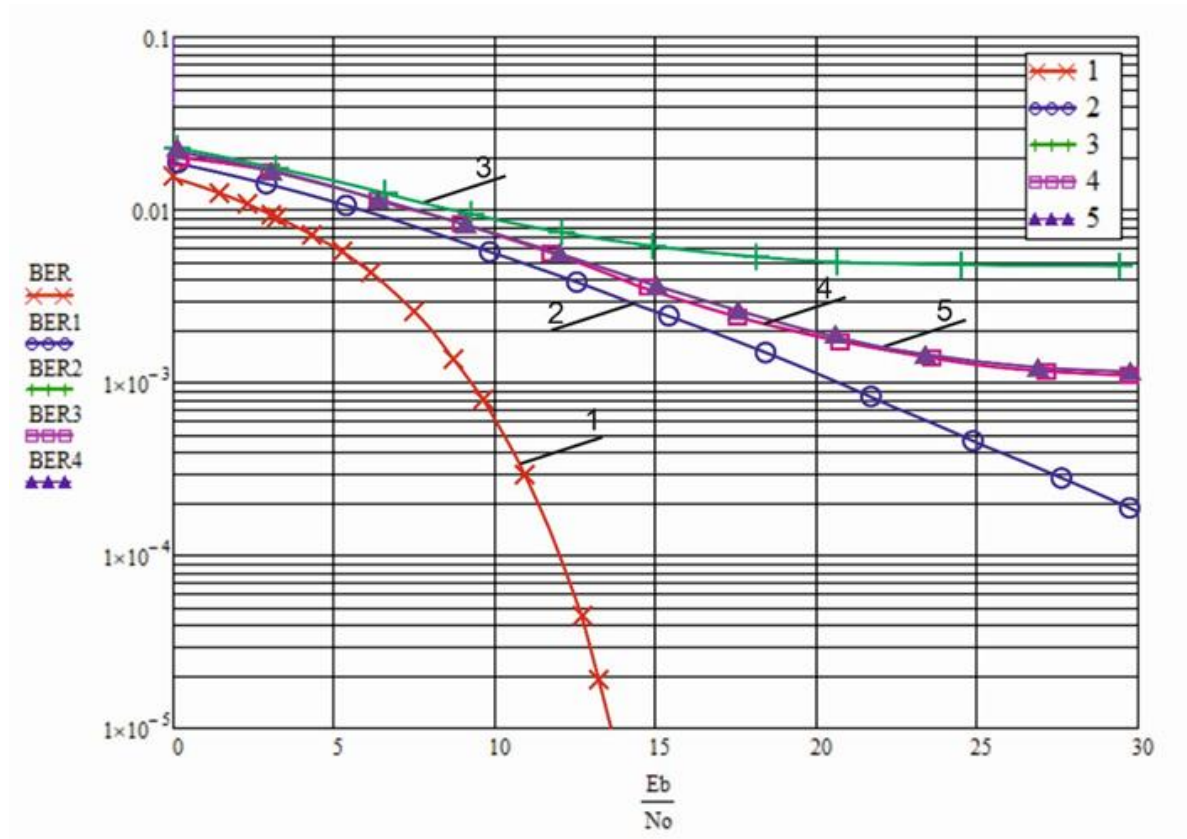


Рисунок 3.7 - Графік завадостійкості каналу з OFDM та довжиною 3 символи

Аналіз графіків рис. 3.6 та 3.7 показує, що вплив міжсимвольної інтерференції на ймовірність бітової помилки в Релеєвському каналі з багатопроменевим завмиранням стає помітним (криві 4 та 5 на рис. 3.7) при зменшенні довжини захисного інтервалу.

У підсумку, цей процес сприяє зниженню рівня помилок, що підтверджується графічними залежностями 3, 4 та 5 на рис. 3.7.

3.2 Технологія OFDMA у стандарті Wi-Fi 6

Множинний доступ з ортогональним частотним розділенням (OFDMA) — це метод доступу, що базується на модуляції OFDM, у якому користувачі можуть отримувати доступ до ресурсів двома способами. Перший спосіб: кожен користувач передає свій сигнал окремо, використовуючи виділені йому часові слоти та всі піднесійні OFDM, що застосовуються для передачі даних.

Такий підхід передбачає поділ за часом (див. рис. 3.8, верхня частина). Другий спосіб: доступний частотно-часовий ресурс розподіляється на базові частотно-часові ресурсні блоки, у яких кілька користувачів можуть передавати дані одночасно через виділені їм неперекривні ресурсні блоки (див. рис. 3.8, нижня частина).

У цьому випадку розподіл піднесійних між користувачами може бути як локалізованим, так і розподіленим (рис. 3.9). На ілюстрації різним кольором позначено ресурсні блоки, що належать різним користувачам.

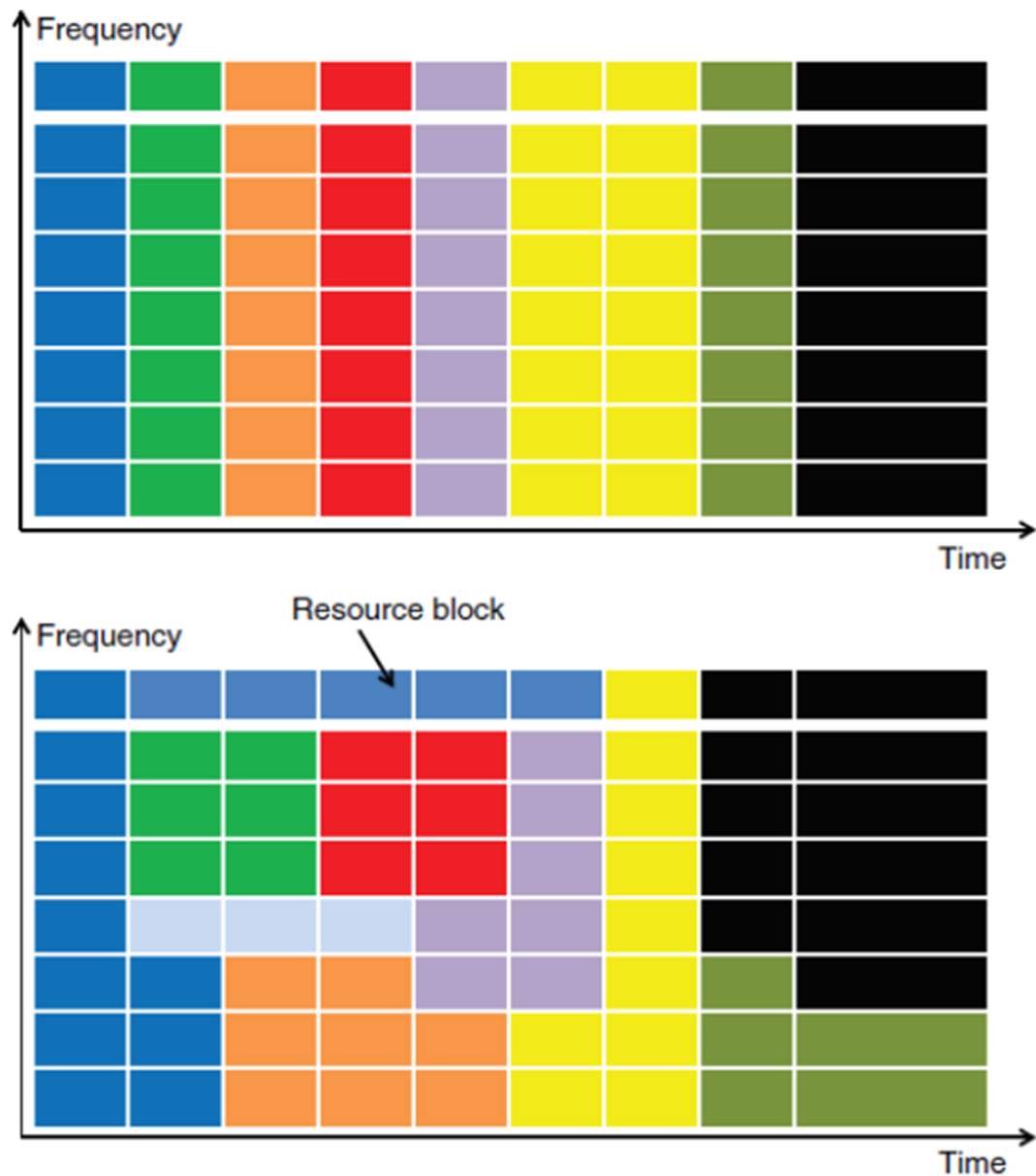


Рисунок 3.8 - Розподіл частотно-часового ресурсу в OFDMA:

зверху – поділ за часом у OFDM, знизу – ресурсні блоки у OFDMA з локалізованими піднесійними

Якщо кожен користувач передає L символів на блок, система може одночасно підтримувати N передач від Q користувачів.

- Локалізований режим: кожному користувачеві призначається L суміжних піднесійних, тоді як решта піднесійних може використовуватися іншими користувачами.
- Розподілений режим: L піднесійних, виділених для кожного користувача, перемежуються з Q іншими піднесійними. Таким чином, піднесійні, які не використовуються конкретним користувачем, можуть бути задіяні іншими.

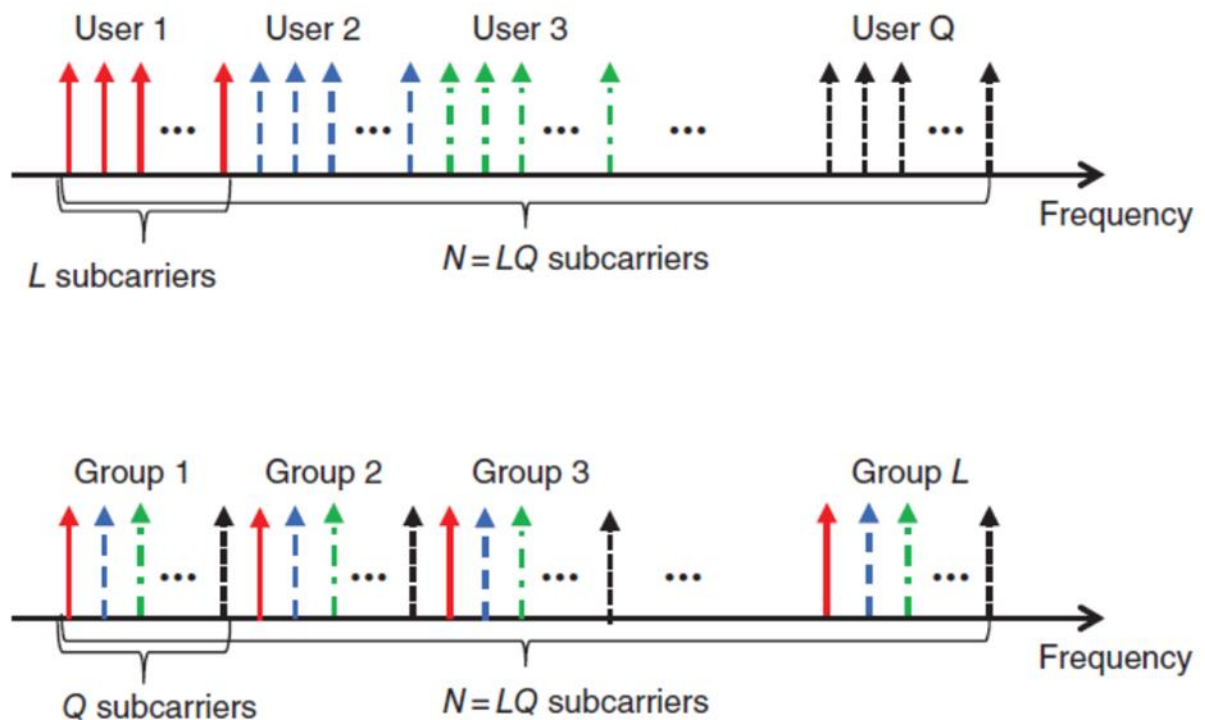


Рисунок 3.9 - Розподіл піднесійних по користувачах в OFDMA у локалізованому (зверху) та розподіленому (знизу) режимах

Таким чином, як уже зазначалося, OFDMA є вдосконаленою версією OFDM. У той час як в OFDM канали між користувачами розподіляються статично – або за часом (OFDM-TDMA), або за частотою (OFDM-FDMA), –

OFDMA забезпечує динамічний розподіл частотно-часових ресурсів. Це означає, що кожному користувачеві виділяються оптимальні підмножини піднесійних, тобто ті, де згасання сигналу мінімальне і рівень завад найнижчий. Переваги OFDMA, яка реалізована у Wi-Fi 6, у порівнянні з OFDM-TDMA, що використовувалася у Wi-Fi 2-5, проілюстровані на рис. 3.10, а, б.

- Wi-Fi 2-5: точка доступу може обслуговувати лише одного користувача за раз, тоді як інші змушені чекати своєї черги.
- Wi-Fi 6: канал передавання поділяється на підканали, що дозволяє одночасно обслуговувати кількох користувачів.

Теоретично, при використанні смуги 160 МГц Wi-Fi 6 може підтримувати до 74 користувачів одночасно. На практиці, у стандартній смузі 20 МГц, зазвичай, обслуговується до 9 користувачів.

Вважається, що завдяки OFDMA швидкодія Wi-Fi 6 зростає в 3-6 разів у порівнянні з попередніми стандартами (Wi-Fi 2-5).

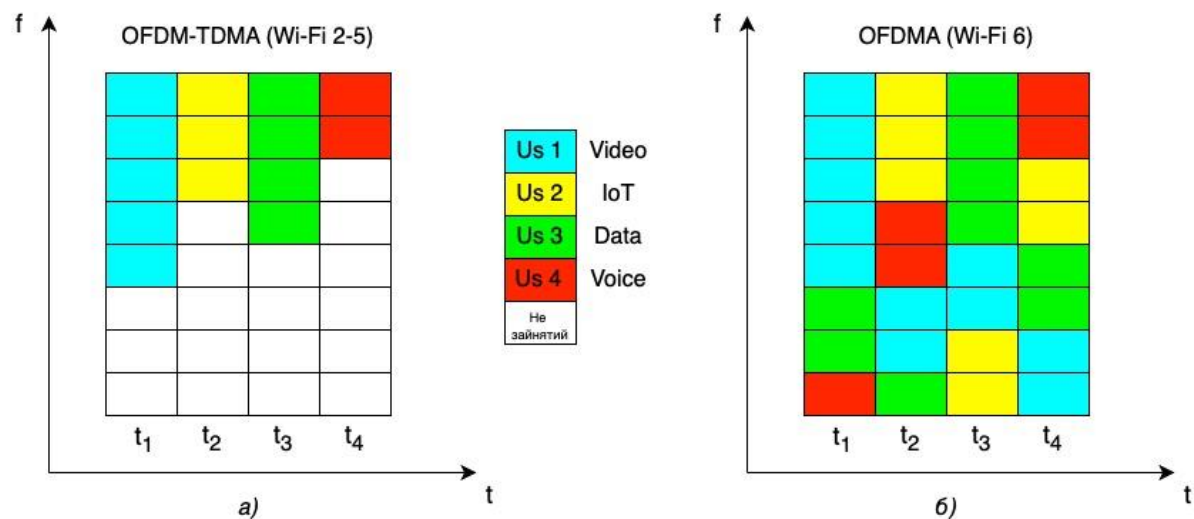


Рисунок 3.10 - Розподіл каналного ресурсу:

при послідовному обслуговуванні користувачів системами поколінь Wi-Fi 2-5;
 при паралельному обслуговуванні користувачів системою покоління Wi-Fi 6

Варто зазначити, що у порівнянні з технологією OFDM, OFDMA не лише підвищує продуктивність мережі, забезпечуючи одночасну передачу даних

декільком користувачам без залучення «несприятливих» підмножин піднесійних, а й зменшує ефекти загасання сигналу через багатопроменеве поширення. Це досягається завдяки можливості динамічного використання частотних стрибків під час передавання даних.

3.3 Технічні можливості OFDMA в Wi-Fi 6

Множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA) дозволяє кожному клієнту або станції (STA) отримувати свій власний ресурсний блок у межах одного PPDU (Physical layer Protocol Data Unit – блок даних протоколу фізичного рівня). Хоча технологія OFDMA не є новою, у сімействі 802.11 вона вперше реалізована саме у стандарті 802.11ax. Найменший ресурсний блок містить 26 піднесійних (смуга 2 МГц), тоді як найбільший може включати до 2×996 піднесійних, охоплюючи смугу 160 МГц.

У Wi-Fi 5 (802.11ac, затверджену у 2014 році) технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) дозволяла передавати дані одночасно чотирьом клієнтам через різні піднесійні. З появою Wi-Fi 6 кількість можливих одночасних підключень збільшилася вдвічі. На відміну від 802.11ac, обладнання стандарту 802.11ax може гнучко керувати розподілом ресурсів у низхідному та висхідному каналах зв'язку на основі PPDU, що фактично виступає механізмом радіопланування точок доступу у частотній та просторовій областях.

Канал OFDMA шириною 20 МГц складається із 256 піднесійних (тонів), які згруповані у менші підканали, відомі як Resource Units (RUs) – ресурсні блоки. При поділі каналу 20 МГц на ресурсні блоки точка доступу 802.11ax може призначати їх у вигляді 26, 52, 106 або 242 піднесійних одиниць, що відповідає смугам 2 МГц, 4 МГц, 8 МГц і 20 МГц відповідно (рис. 3.11). Таким чином, 802.11ax забезпечує гнучке використання частотного ресурсу,

динамічно змінюючи конфігурацію піднесійних залежно від потреб передавання даних.



Рисунок 3.11 – Розподіл каналу 20 МГц на ресурсні блоки

Точка доступу 802.11ax може як повністю виділити весь канал одному клієнту в конкретний момент часу, так і розподілити його між кількома клієнтами завдяки можливостям OFDMA. Наприклад, точка доступу може забезпечити зв'язок з одним клієнтом у смузі 8 МГц, одночасно обслуговуючи ще трьох клієнтів через субканали 4 МГц. Цей механізм ефективно працює як для uplink-, так і для downlink-трафіку.

У Таблиці 3.1 наведено можливі варіанти керування ресурсними блоками. Наприклад, для простих схем зв'язку достатньо 1,9 МГц смуги, 26 піднесійних і двох пілотних сигналів. Натомість для високошвидкісного передавання даних може використовуватися ширша смуга 153,2 МГц, 996 піднесійних (тонів) та 32 пілотні сигнали.

У Wi-Fi 6 ресурсні блоки використовуються для розподілу піднесійних, причому точка доступу визначає їх у межах фіксованих частотних смуг каналу (20, 40, 80, 80+80 або 160 МГц). Кожен ресурсний блок може мати власну схему модуляції, швидкість кодування та рівень потужності, що дає змогу

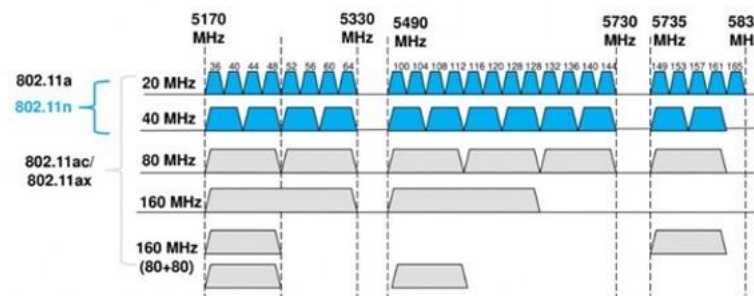
ефективно керувати передачею даних. Точка доступу контролює зв'язок в обох напрямках, призначаючи ресурсні блоки відповідним часовим інтервалам OFDMA.

Таблиця 3.1 – Кількість ресурсних блоків на канал у Wi-Fi 6

Несійні	Пілот.	Смуга пропускання (дані), МГц	20 МГц	40 МГц	80 МГц	160 МГц	80+80 МГц
26	2	1,9	9	18	37	74	74
52	4	3,8	4	8	16	32	32
106	4	8,0	2	4	8	16	16
242	8	18,3	1	2	4	8	8
484	16	36,6	-	1	2	4	4
996	16	76,6	-	-	1	2	2
996	32	153,2	-	-	-	1	1

Функція Channel Bonding у Wi-Fi 6 дозволяє об'єднувати канали шириною від 20 до 160 МГц, причому їх з'єднання може відбуватися не лише в межах сусідніх діапазонів. Наприклад, один ресурсний блок може бути взятий із 5,17 ГГц, а інший — із 5,135 ГГц. Це забезпечує більшу гнучкість у формуванні радіосередовища, навіть за умов сильних перешкод або наявності інших активних станцій. Рисунок 3.12 ілюструє каналний розподіл у діапазоні 5 ГГц.

5 GHz Channel Bonding



- Два сусідні канали шириною 20 МГц об'єднуються в один канал шириною 40 МГц. Один із цих двох 20 МГц каналів є основним (primary), а інший - допоміжним (auxiliary).

Наприклад, для каналу 149 ширина 40 МГц досягається шляхом об'єднання з іншим каналом. Тобто, ширина 40 МГц формується за рахунок каналів 149 та 153. Позначення 149+ вказує, що 40 МГц канал утворюється шляхом об'єднання 20 МГц каналу з центральною частотою 149 і 20 МГц каналу з центральною частотою 153.

- Два сусідні 40 МГц канали можуть бути об'єднані в канал шириною 80 МГц, а два сусідні 80 МГц канали — в канал шириною 160 МГц.

- Основний канал використовується для передавання керуючих і службових пакетів. Канал вважається вільним тільки тоді, коли його основний канал є вільним.

Рисунок 3.12 – Канальний розподіл на частоті 5 ГГц

Теоретично, одна точка доступу Wi-Fi 6 може підтримувати до 74 одночасних підключень. Хоча таке навантаження є крайнім випадком використання ресурсів мережі, технологія OFDMA відкриває можливості для масштабного підключення пристроїв.

Загалом, Wi-Fi 6 має значно вищу пропускну здатність порівняно з попередніми стандартами, що робить його ідеальним для використання в місцях із високою концентрацією користувачів, таких як корпоративні гостьові зони, аеропорти та інші громадські простори. Крім того, OFDMA дозволяє оптимізувати витрати на розгортання та обслуговування мережі, забезпечуючи високу продуктивність без необхідності значного збільшення кількості точок доступу.

3.4 Технологія OFDMA у стандарті LTE

Як уже зазначалося, технологія OFDMA застосовується в низхідному каналі стандарту LTE. Вона дозволяє розділяти доступний частотний спектр на кілька вузьких каналів, надаючи кожному користувачу власний субканал. Це особливо ефективно у високощільних мережах, де кілька користувачів можуть одночасно передавати дані, зменшуючи рівень інтерференції.

Основна перевага OFDMA — мінімізація взаємних завад завдяки ортогональності частотних каналів. Оскільки кожен користувач працює у виділеному підканалі, це знижує ризик перехресних перешкод між абонентами. Крім того, технологія забезпечує адаптивний розподіл ресурсів відповідно до якості каналу та потреб користувачів. Наприклад, пристрої з кращими умовами прийому можуть отримати більше частотних ресурсів, тоді як користувачі з гіршими умовами — менше, що сприяє оптимальному використанню мережевих потужностей.

В умовах високої мобільності, коли пристрої постійно змінюють своє розташування, OFDMA підтримує стабільність з'єднання за рахунок динамічного перепризначення підканалів. Це особливо важливо для мереж зі змінною топологією, де ефективне управління ресурсами дозволяє зберігати високу якість зв'язку.

Проте, на практиці досягти теоретичних показників часто неможливо через високу щільність користувачів. До основних обмежень належать затримки в доступі до середовища передачі, взаємний вплив точок доступу та інші фактори.

Використання OFDMA у низхідному каналі (DownLink) стандарту LTE-4G проілюстровано на рисунку 3.13.

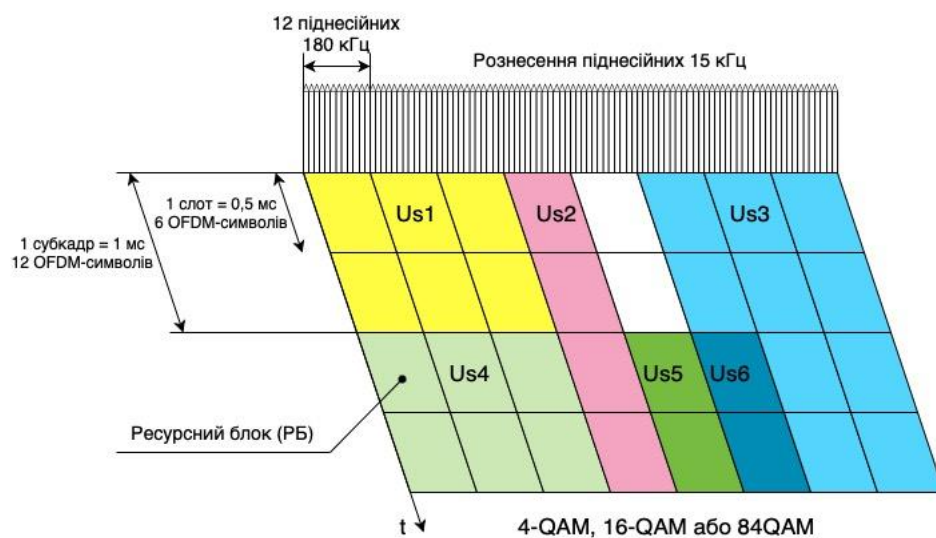


Рисунок 3.13 - Динамічний розподіл каналів для користувачів (Us1...Us6)

Кількість OFDM-символів у слоті визначається розміром збільшеного цифрового префіксу (ЦП). У системі LTE-4G увесь ресурс низхідного каналу поділяється на ресурсні блоки (РБ) та ресурсні елементи (РЕ).

Мінімальною одиницею інформації в каналі є ресурсний блок (РБ), який містить 12 піднесійних частот у часовому інтервалі (слоті) тривалістю 0,5 мс. Піднесійні розташовані з кроком $\Delta f = 15$ кГц, що визначає загальну смугу РБ

$$B_{PB} = 12 \cdot 15 = 180 \text{ кГц.}$$

Ресурсний елемент (РЕ) визначається як одна піднесійна частота у частотній області та один OFDM-символ у часовій області. У разі використання конфігурації РБ із шістьма OFDM-символами в одному слоті, кожен ресурсний блок (РБ) містить $12 \times 6 = 72$ РЕ, як показано на рисунку 3.14.

Усі часові інтервали в LTE-4G вимірюються через базовий інтервал T_S , що відповідає періоду тактування та називається «часовою одиницею».

$$T_S = 1/F_S = 1/(2048 \cdot \Delta f) = 1/(2048 \cdot 15 \text{ кГц}) = 1/(30,72 \text{ МГц}) \approx 0,033 \text{ мкс,}$$

де F_S – частота тактування; $\Delta f = 1/T_U = 1/2048 \cdot T_S = 15 \text{ кГц}$ – частотне рознесення піднесійних OFDM-радіосигналу.

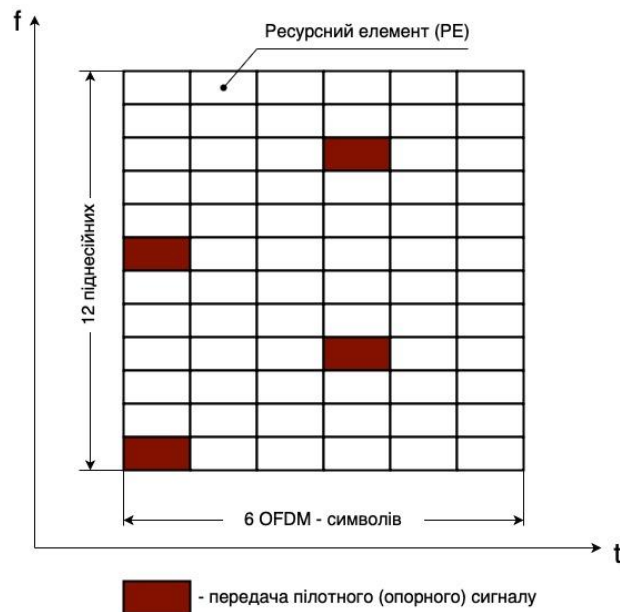


Рисунок 3.14 - Розподіл пілотних піднесійних в РБ

Частота 30,72 МГц є кратною частоті обробки 3,84 МГц у системі WCDMA-3G (Wideband Code Division Multiple Access – широкосмуговий

множинний доступ з кодовим розділенням), що забезпечує сумісність роботи між LTE-4G та WCDMA-3G.

Кількість OFDM-символів у слоті залежить від тривалості циклічного префікса (ЦП). При збільшеній тривалості ЦП слот містить 6 OFDM-символів, тоді як при стандартній тривалості – 7 OFDM-символів.

Тривалість «збільшеного» ЦП

$$T_G = 512 \cdot T_S = 0,25 \cdot T_U \approx 16,7 \text{ мкс.}$$

«Збільшений» ЦП застосовується у великих стільниках і дозволяє виключити негативний вплив на корисну радіохвилю відлуння радіохвиль з «різницею ходу»

$$S = c \cdot 512 \cdot T_S = 3 \cdot 10^8 \cdot 16,7 \cdot 10^{-6} \approx 5000 \text{ м.}$$

Якщо у слоті 7 OFDM-символів, то тривалість ЦП у першому символі $160 \cdot T_S$, у наступних символах $144 \cdot T_S \approx 4,7 \text{ мкс.}$

При цьому виключається негативний вплив відлуння радіохвиль із «різницею ходу»

$$S = c \cdot 144 \cdot T_S = 3 \cdot 10^8 \cdot 4,7 \cdot 10^{-6} \approx 1400 \text{ м.}$$

Тривалість корисної частини OFDM-символу

$$T_U = 2048 \cdot T_S = 1/\Delta f = 1/15 \text{ кГц} \approx 66,7 \text{ мкс.}$$

Слот має тривалість

$$T_{\text{сл}} = 15360 \cdot T_S = 0,5 \text{ мс.}$$

Субкадр складається з 2-х слотів і має тривалість

$$T_{СК} = 30720 \cdot T_S = 1 \text{ мс.}$$

Кадр (пакет даних) містить 10 субкадрів та має тривалість

$$T_K = 307200 \cdot T_S = 10 \text{ мс.}$$

Параметри низхідних каналів системи LTE-4G представлені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Деякі параметри DownLink-каналів системи LTE-4G

Виділена ширина смуги, МГц, B^*	1,25	3,0	5,0	10,0	15,0	20,0
Кількість ресурсних блоків, $N_{РБ}$	6	15	25	50	75	100
Ширина смуги одного РБ, кГц, $B_{РБ}$	180	180	180	180	180	180
Ширина смуги, що використовується, МГц, $B = B_{РБ} \cdot N_{РБ} < B^*$	1,08	2,7	4,5	9,0	13,5	18,0
Кількість інформаційних піднесійних (ІП) та пілотних піднесійних (ПП), $N_{ІП} + N_{ПП}$	72	180	300	600	900	1200
Кількість захисних піднесійних (ЗП), $N_{ЗП}$	56	76	212	424	636	848
Розмір ЗДПФ, $N = N_{ІП} + N_{ПП} + N_{ЗП}$	128	256	512	1024	1536	2048
Частота вибірки, МГц, $F_S^* = N \cdot \Delta f$, $\Delta f = 1/T_U = 15 \text{ кГц}$	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72

Технологія OFDMA у системі LTE-4G надає базовій станції (БС) можливість динамічно розподіляти частотно-часові ресурси між мобільними станціями (МС) залежно від їхньої кількості в стільнику та потреб у трафіку (див. рис. 2.1).

Чим більше ресурсних блоків (РБ) виділяється для однієї МС, тим вища швидкість передачі даних між нею та БС.

Зокрема, у низхідному каналі мобільна станція може отримати весь частотно-часовий ресурс базової станції, тобто 100 РБ (див. таблицю 2.1). У

такому випадку максимальна швидкість передачі даних у низхідному каналі (від БС до МС) при модуляції 64-QAM, без використання MIMO (Multiple Input Multiple Output), можна оцінити наступним чином:

$$R_b = \frac{N_{\text{РБ}} \cdot N_{\text{пРБ}} \cdot n_{64\text{-QAM}} \cdot N_{\text{сим/сл}} \cdot N_{\text{сл/к}}}{T_k} = \frac{100 \cdot 12 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 20}{10} \approx 100 \text{ Мбіт/с},$$

де $N_{\text{РБ}}$ - кількість РБ ($N_{\text{РБ}} = 100$); $N_{\text{пРБ}}$ - кількість піднесійних в одному РБ ($N_{\text{пРБ}} = 12$); $n_{64\text{-QAM}}$ - кількість бітів в одному символі при 64-QAM ($n_{64\text{-QAM}} = 6$); $N_{\text{сим/сл}}$ - кількість OFDM-символів в одному слоті ($N_{\text{сим/сл}} = 7$); $N_{\text{сл/к}}$ - кількість слотів в одному кадрі ($N_{\text{сл/к}} = 20$).

Швидкість цифрового потоку в низхідному каналі може бути збільшена в 2 або 4 рази (приблизно до 200 Мбіт/с або до 400 Мбіт/с) при використанні технології MIMO 2x2 або технології MIMO 4x4.

Швидкість передавання даних у висхідному каналі приблизно втричі нижча, ніж у низхідному. Це зумовлено різницею в максимальній потужності передавачів базової станції (БС) та мобільної станції (МС).

Для одного абонента передавач БС може працювати з потужністю до 46 дБм (40 Вт) на канал, тоді як передавач МС залежно від частотного діапазону має обмеження 23–25 дБм (0,2–0,32 Вт). Через це БС може використовувати більше ресурсних блоків (РБ) у низхідному каналі, ніж МС у висхідному.

У технології LTE OFDMA застосовується в низхідному каналі (Downlink, DL) для організації доступу до частотного спектра. Для висхідного каналу (Uplink, UL) зазвичай використовується SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access), що є модифікацією OFDMA, оптимізованою для зменшення пікової потужності сигналу.

Доступний спектр у LTE поділяється на вузькі піднесійні (зазвичай по 15 кГц кожна). Групи піднесійних формують ресурсні блоки (РБ) – мінімальну одиницю розподілу спектра. Один РБ містить 12 піднесійних і займає 180 кГц. Розподіл ресурсів здійснюється кожні 1 мс, і вони призначаються користувачам залежно від умов каналу, QoS-пріоритетів та вимог до пропускної здатності.

Завдяки ортогональності піднесійних мінімізується взаємна інтерференція. Для модуляції використовуються різні схеми: QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM. LTE застосовує MIMO для збільшення ємності мережі та швидкості передачі.

3.5 Висновки до розділу

Технології множинного доступу OFDMA у мережах стільникового зв'язку LTE та широкосмугового доступу Wi-Fi 6 дозволяють одночасно передавати дані кільком користувачам, розподіляючи піднесійні за частотним і часовим доменами. У розділі розглянуто особливості реалізації цієї технології в обох зазначених мережах.

У точці доступу (AP, роутер) мережі Wi-Fi 6 технологія OFDMA використовується як у низхідному каналі Downlink (DL), так і у висхідному Uplink (UL). Точка доступу динамічно розподіляє ресурсні блоки Resource Units (RU) (26, 52, 106, 242, 484, 996, 2×996 тонів) між користувачами. При цьому підтримується гнучка ширина каналу (20/40/80/160 МГц). Має місце гнучка ширина піднесійних 78,125 кГц, що масштабується під ширину каналу.

Абонентський пристрій (STA, смартфон, ноутбук) використовує виділений йому ресурсний блок RU у DL та виконує демодуляцію отриманого сигналу. У висхідному каналі uplink передає дані у призначеному ресурсному блоці RU (менше колізій). Крім цього, аналізує стан каналу та передає BSS Coloring для адаптації.

На базовій станції eNB мережі LTE технологія OFDMA працює тільки у низхідному каналі Downlink (DL). Базова станція виконує централізоване планування ресурсів - eNB розподіляє ресурсні блоки між абонентськими пристроями UE. Має місце фіксована ширина смуги на кожній піднесійній, яка становить 15 кГц. Кожен ресурсний блок (RB) містить 12 піднесійних і має тривалість 0,5 мс. Максимальне значення ширини смуги каналу для одного користувача не більше 20 МГц. У висхідному каналі uplink використовується технологія для зменшення пік-фактора SC-FDMA.

В абонентському пристрої (UE) відбувається прийом призначених ресурсних блоків та виконується демодуляція сигналів. В uplink абонентський пристрій передає дані через SC-FDMA, зокрема для адаптації розподілу RB.

4 ЕНЕРГЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ LTE

4.1 Розрахунок висхідного каналу

Розрахунок висхідної (uplink) лінії зв'язку в системі LTE включає кілька послідовних етапів:

- визначення граничної потужності сигналу на вході приймача базової станції;
- оцінювання необхідного рівня потужності сигналу для забезпечення заданої якості зв'язку;
- розрахунок ефективної ізотропно випромінюваної потужності (EIRP) мобільної станції;
- визначення максимально допустимих втрат у тракті поширення сигналу [8].

4.1.1 Розрахунок граничної потужності сигналу на вході приймача базової станції

Гранична потужність сигналу на вході приймача базової станції визначається за наступним виразом:

$$P_{прБС}(\partial БМВт) = P_{ш}(\partial БМВт) + (E_b/N_0)_{нотр}(\partial б) - G_{обр}(\partial Б), \quad (4.1)$$

де $P_{ш}$ — потужність власних шумів приймача;

$(E_b/N_0)_{нотр}$ — необхідне відношення енергії біт/шум;

$G_{обр}$ — виграш від обробки сигналу.

Для подальшого аналізу використано характеристики базової станції Nokia Flexi WCDMA BTS. Згідно з технічними даними, коефіцієнт шуму приймача становить менше 2 дБ. Для розрахунків приймаємо: $K_{ш}=2$ дБ.

Рівень шумів у приймачі базової станції визначається за формулою:

$$P_{ш}=N+K_{ш} \text{ (дБмВт)} \quad (4.2)$$

Мінімальне необхідне значення відношення E_b/N_0 для обраного типу сервісу становить 4,4 дБ при швидкості користувача 3 км/год.

Виграш від обробки сигналу обчислюється за формулою:

$$G_{обр}=10\log(R_{чин}/R_{корист}) \quad (4.3)$$

де $R_{чин}$ — чіпова швидкість у стандарті LTE;

$R_{корист}$ — швидкість передачі даних користувача, кбіт/с.

Крім цього, необхідно врахувати виграш за рахунок використання м'якого хендоверу та внести поправку на внутрішньосистемні завади. Значення виграшу хендоверу приймається: $G_{хо}=3$ дБ. Запас на внутрішньосистемні перешкоди обчислюється за формулою:

$$M_{Int} = -10 \cdot \log_{10}(1 - \eta) \quad (4.4)$$

Для початкового розрахунку приймається відносне завантаження стільники на рівні: $\eta = 0,5$ (тобто 50%).

У результаті, з урахуванням усіх зазначених факторів, гранично допустимий рівень потужності сигналу на вході приймача базової станції визначається за формулою:

$$P_{прБС}=P_{ш}+(E_b/N_0)_{номр}-G_{обр}+L_{п}-G_{хо} \text{ (дБмВт)} \quad (4.5)$$

Вихідні дані для розрахунку: $K_{ш}=2\text{дБ}$, $(E_b/N_0)=4,4\text{ дБ}$, $R_{\text{чин}}=3,84\cdot 10^6\text{ чин/с}$,
 $R_{\text{корист}}=384\text{ кбіт/с}$, $\eta=0,5$.

Розрахунок потужності теплового шуму в приймачі:

$$N=k\cdot T\cdot B=1,38\cdot 10^{-23}\cdot 298\cdot 4,2\cdot 10^6=1,72\cdot 10^{-14}\text{ Вт.}$$

$$N=10\cdot \lg(1,72\cdot 10^{-14}/0,001)=-117,7\text{ дБмВт.}$$

Потужність шумів у приймачі базової станції:

$$P_{ш}=N+K_{ш}=-117,7+2=-115,7\text{ дБмВт.}$$

Виграш від обробки:

$$G_{обр}=10\cdot \log(384\cdot 10^3/3,84\cdot 10^6)=10\text{дБ.}$$

Запас на внутрішньосистемні перешкоди:

$$M_{Int}=-10\cdot \log_{10}(1-0,5)=3\text{дБ.}$$

Остаточню, граничний рівень потужності сигналу:

$$P_{прБС}=-115,7+4,4-10+3-3=-121,3\text{ дБм.}$$

4.1.2 Визначення потужності сигналу мобільної станції

Рівень необхідної потужності сигналу, що має бути забезпечений для надійного прийому на базовій станції, визначається за наступною формулою:

$$P_{пр}=P_{прБС}+L_{фідер}-G_{БС}+L_{ff}(\text{дБм}) \quad (4.6)$$

де $L_{фідер}$ — втрати сигналу в фідерній лінії (дБ). У практиці вибір типу та довжини фідера здійснюється таким чином, щоб ці втрати не перевищували 3 дБ;

$G_{БС}$ — коефіцієнт підсилення антени базової станції;

L_{ff} — запас, що враховує швидкі завмирання сигналу (дБ).

Вихідні дані для розрахунку: $L_{фідер}=0,38\text{ дБ}$, $G_{БС}=19\text{ дБ}$, $L_{ff}=3\text{ дБ}$,

$$P_{прБС}=-111,3\text{ дБм.}$$

Підставляючи ці значення у формулу (4.6), отримаємо:

$$P_{np} = -111,3 + 0,38 + 19 + 3 = -107 \text{ дБ}.$$

Таким чином, для забезпечення стійкого прийому на базовій станції необхідно забезпечити потужність сигналу не нижче ніж -107 дБм [12].

4.1.3 Розрахунок ефективно випромінюваної потужності мобільної станції

Ефективно випромінювана потужність сигналу мобільної станції визначається за формулою:

$$P_{\text{вип}MC} = P_{MC} + G_{BC} - L_m \text{ (дБмВт)} \quad (4.7)$$

де P_{MC} — потужність передавача мобільної станції;

G_{BC} — коефіцієнт підсилення антени базової станції;

L_m — втрати сигналу внаслідок загасання в тілі абонента.

Згідно зі стандартом, для мобільних станцій класу 4 мінімальна потужність передавача становить 21 дБмВт. У розрахунках коефіцієнт підсилення антени базової станції приймається рівним 0 дБ.

Втрати на загасання в тілі абонента приймаються на рівні 3 дБ — це актуально передусім для голосових сервісів. У випадку передачі даних ці втрати можуть не враховуватися.

Приклад розрахунку.

Необхідно обчислити ефективно випромінювану потужність мобільної станції UMTS, якщо задані: потужність передавача $P_{MC} = 12$ дБмВт, коефіцієнт підсилення антени: $G_{BC} = 0$ дБ, втрати в тілі абонента: $L_m = 1$ дБ.

Підставляючи значення у формулу (4.7), отримаємо:

$$P_{\text{вип}MC} = 12 - 1 = 11 \text{ дБмВт} \approx 12,5 \text{ мВт}.$$

4.1.4 Визначення максимально допустимих втрат

Максимально допустиме значення втрат на трасі між мобільною станцією та базовою станцією визначається за наступною залежністю:

$$L = P_{\text{вип}MC} - P_{np} \quad (4.8)$$

де $P_{\text{вип}MC}$ — ефективно випромінювана потужність мобільної станції;

$P_{\text{пр}}$ — необхідна потужність сигналу на вході приймача базової станції.

Підставляючи значення у формулу (4.8), отримаємо:

$$L = 11 - (-107) = 118 \text{ дБ}$$

Отже, максимально допустимі втрати на трасі становлять 118 дБ.

4.2 Розрахунок низхідного каналу

Цей розрахунок також проводиться поетапно, з урахуванням наступних кроків:

- розрахунок граничної потужності сигналу, який має бути на вході приймача мобільної станції;
- визначення рівня потужності сигналу, необхідного для забезпечення стабільного прийому;
- обчислення ефективно випромінюваної потужності базової станції;
- обчислення максимально допустимих втрат на радіотрасі між базовою та мобільною станцією [8].

4.2.1 Визначення граничної потужності сигналу на вході приймача мобільної станції

Гранична потужність сигналу на вході приймача мобільної станції визначається за тією ж формулою, що й для базової станції — згідно з виразом (4.1).

Оскільки приймач мобільної станції має менш складну архітектуру порівняно з базовою станцією, у ньому використовуються простіші компоненти. Це призводить до вищого коефіцієнта шуму. Відповідно до стандарту, цей коефіцієнт не повинен перевищувати 9 дБ. У розрахунках приймаємо значення $K_{ш} = 8 \text{ дБ}$.

Потужність внутрішніх шумів приймача мобільної станції визначається за формулою (4.2):

$$P_{ш} = N + K_{ш} = -117,7 + 8 = -109,3 \text{ дБмВт.}$$

З урахуванням запасу на внутрішньосистемні завади та виграшу від м'якого хендоверу, мінімально допустимий рівень сигналу на вході приймача МС розраховується за формулою:

$$P_{прМС} = P_{ш} + (E_b/N_0)_{нотр} - G_{обр} + L_n - G_{хо} = -109,3 + 7,9 - 8 + 5 - 3 = -107,4 \text{ дБм.}$$

де $(E_b/N_0)_{нотр}$ — необхідне відношення енергії біт/спектральна щільність шуму, яке становить 4,8 дБ для швидкості абонента 3 км/год;

$$G_{обр} = 10 \log(R_{чин}/R_{корист}) = 10 \log(384 \cdot 10^3 / 3,84 \cdot 10^6) = 8 \text{ дБ.}$$

4.2.2 Визначення потужності сигналу базової станції

Необхідний рівень потужності сигналу визначається відповідно до виразу (4.6) з урахуванням втрат у фідерній лінії та запасу на швидкі завмирання, і розраховується як:

$$P_{пр} = -107,9 + 1 + 3 = -103,9 \text{ дБм.}$$

4.2.3 Розрахунок ефективно випромінюваної потужності базової станції

Ефективно випромінювана потужність базової станції (БС) розраховується за виразом (4.7). Для початкових розрахунків припускаємо:

$$P_{БС} = 50/55 = 0,9 \text{ Вт} = 900 \text{ мВт} (29 \text{ дБм}).$$

Розрахуємо потужність на 1 кодовий канал:

$$P_{випБС1} = 29 + 19/55 - 2 = 27 \text{ дБм} = 0,53 \text{ мВт.}$$

Тепер розрахуємо загальну ефективну потужність випромінювання базової станції для всіх каналів:

$$P_{випБС} = 0,53 \times 55 = 29,15 \text{ Вт.}$$

Отже, ефективно випромінювана потужність базової станції становить 29,15 Вт.

4.2.4 Розрахунок допустимих втрат на трасі

Допустимі втрати на трасі визначаються за формулою (4.8):

$$L = P_{випМС} - P_{пр} = 15 - (-100,9) - 22 = 107,9 \text{ дБ.}$$

Отже, допустимі втрати на трасі становлять 107,9 дБ [12].

4.3 Висновки до розділу

У цьому розділі виконано енергетичні розрахунки каналів передачі в системі LTE, зокрема для висхідного та низхідного каналів. У процесі розрахунків було визначено граничну потужність сигналу на вході приймача базової станції, потужність сигналу мобільної станції, ефективно випромінювану потужність та допустимі втрати на трасі поширення сигналу. Особлива увага була приділена врахуванню факторів шуму, виграшу від обробки сигналу, а також ефекту м'якого хендовера.

Для висхідного каналу було розраховано необхідний рівень потужності сигналу, що забезпечує стабільний прийом на базовій станції, і максимальні допустимі втрати сигналу. Потужність передавача мобільної станції була обчислена з урахуванням стандартів та специфікацій для класу 4 мобільних станцій. Для низхідного каналу також було виконано відповідні розрахунки, враховуючи специфіку роботи приймачів мобільної станції та базової станції.

У результаті проведених розрахунків отримано значення максимально допустимих втрат для обох каналів, що дозволяє оптимізувати параметри системи LTE для забезпечення надійного зв'язку в умовах реального середовища. Підсумовуючи, можна стверджувати, що результати цих розрахунків є важливими для ефективного проектування та експлуатації мережі LTE, забезпечуючи необхідний рівень якості зв'язку та мінімальні втрати сигналу на всіх етапах поширення.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Дослідження ефективності поєднання алгоритму чергування (interleaving) та технологій множинного доступу в умовах значних завад є актуальним у контексті розвитку сучасних телекомунікаційних систем. Зростання попиту на високошвидкісну передачу даних у бездротових мережах, таких як 5G та майбутні 6G, вимагає створення стійких до перешкод рішень, які забезпечують надійність і ефективність зв'язку. Алгоритм interleaving, спрямований на розподіл даних для зменшення впливу пакетних помилок, у поєднанні з технологіями множинного доступу, такими як TDMA, CDMA чи OFDMA, може значно підвищити продуктивність систем у складних електромагнітних умовах. Водночас проведення таких досліджень потребує суворого дотримання принципів охорони праці, оскільки робота з радіочастотним обладнанням, вимірювальними приладами та програмним забезпеченням пов'язана з потенційними ризиками для здоров'я та безпеки дослідників. У цьому контексті важливим є не лише досягнення технічних цілей, а й забезпечення безпечних умов праці, що відповідають нормативним вимогам і мінімізують професійні ризики.

Під час дослідження ефективності поєднання алгоритму interleaving та технології множинного доступу в умовах значних завад на працівника могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; підвищений

рівень шуму на робочому місці; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; підвищена чи понижена іонізація повітря; пряма і відбита блискість; підвищення яскравість; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження; розумове перевантаження; емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

5.1. Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Вимоги безпеки до робочого місця проєктанта включають ряд аспектів, які мають на меті забезпечити безпеку та здоров'я працівника під час виконання його професійних обов'язків. Основні вимоги можуть включати:

Організація робочого місця: Робоче місце має бути організоване таким чином, щоб забезпечити комфорт та безпеку працівника. Це може включати належне розташування обладнання та меблів, достатнє освітлення, вентиляцію і температурний режим.

Безпечне обладнання та інструменти: Проєктант повинен мати доступ до безпечного та належно підтриманого обладнання та інструментів. Вони повинні бути перевірені на відповідність стандартам безпеки та регулярно підтримуватися.

Інструктаж і навчання з питань безпеки: Проєктант повинен бути підготовлений інструктажем та навчанням з питань безпеки щодо правильного використання обладнання, заходів запобігання травм та інших потенційних ризиків на робочому місці.

Організація протипожежного захисту: Робоче місце проєктанта повинно бути обладнане необхідними засобами протипожежного захисту, включаючи вогнегасники та інші протипожежні засоби, а також проведення відповідних навчальних заходів щодо дій у випадку пожежі.

Заходи з охорони здоров'я: Робоче місце має бути організоване таким чином, щоб зменшити ризик виникнення стресу, перевтоми та інших проблем здоров'я, наприклад, за допомогою регулярних перерв у роботі та можливості фізичної рекреації.

Вимоги щодо робочого середовища: Робоче середовище повинно відповідати вимогам щодо якості повітря, звуку та інших факторів, що можуть впливати на здоров'я працівника.

Загальний принцип полягає в тому, щоб забезпечити проектанту безпечне та здорове робоче середовище, що сприяє ефективності його роботи та загальному благополуччю.

Робоче місце і взаємне розташування усіх її елементів має відповідати антропометричним, фізичним і неординарним психологічним вимогам [2]. Важливе значення має також характеру роботи. Зокрема, з організацією робочого місця проектувальника мають бути дотримані такі основні умови:

- оптимальне розміщення устаткування, що до складу робочого місця;
- достатній робочий простір, що дозволяє здійснювати всі необхідні руху, і переміщення;
- необхідне природне, і штучне висвітлення до виконання поставлених завдань;
- рівень акустичного шуму, який не перевищує допустимого значення;
- достатня вентиляція робочого місця;

Головними елементами робочого місця є письмовий стіл і крісло. Основним робочим положенням є положення сидячи. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи організується відповідно до вимог [2].

При проектуванні необхідно врахувати можливість різного розміщення документів, наприклад, їх розташування збоку від комп'ютера, між монітором і клавіатурою тощо. Крім того, у випадках, коли якість зображення на екрані

комп'ютера низька, наприклад, відзначається помітне миготіння, рекомендується збільшити відстань від очей до екрана (приблизно 700 мм), щоб уникнути негативного впливу на зір. Ця відстань може бути більшою, ніж відстань від очей до документа (300–450 мм). У загальному випадку, при високій якості зображення на екрані комп'ютера, рекомендується рівна відстань від очей користувача до екрана, документа і клавіатури.

Велике значення надається характеристикам робочого крісла [3]. При проектуванні крісла виходять з того, що при будь-якому робочому положенні дослідника його поза повинна бути фізіологічно правильно обгрунтованою, тобто положення частин тіла повинно бути оптимальним. Для задоволення вимог фізіології, що впливають з аналізу положення тіла людини в положенні сидючи, конструкція робочого сидіння повинна відповідати таким основним вимогам:

- допускати можливість зміни положення тіла, тобто забезпечити вільне переміщення корпусу і кінцівок тіла один щодо одного;
- допускати регулювання висоти в залежності від росту працюючої людини (в межах від 400 до 550 мм);
- мати злегка увігнуту поверхню, мати невеликий нахил, тому поверхню сидіння рекомендується робити м'якою, передній край закругленим, а кут нахилу спинки робочого крісла - регульованим.

Приміщення, де здійснювалася робота за небезпекою ураження електричним струмом можна віднести до 1 класу, тобто це приміщення без підвищеної небезпеки (сухе, мало заповишене, з нормальною температурою повітря, ізолюваними підлогами і малим числом заземлених приладів) [4].

На робочому місці має бути забезпечена безпека з усіх аспектів, включаючи обладнання. У нашому випадку, лише корпус системного блоку комп'ютера виготовлений із металу. Крім того, цей корпус має робочу ізоляцію та елемент для заземлення, а також провід з заземлюючим жилком, який підключений до джерела живлення.

Електротехнічне устаткування, включаючи апаратуру, кабелі та розподільні пристрої, відповідає усім стандартам і може працювати навіть при аварійних ситуаціях, таких як коротке замикання, перенапруга або перевантаження.

Для забезпечення безпеки були прийняті такі технічні заходи:

- Струмопровідні частини недоступні працівникам завдяки схованій проводці та спеціальним ринвам для кабелів.
- Струмопровідні частини ізолювані за допомогою ізоляції, опір якої не менше 1 кОм/В, і регулярно перевіряються та обслуговуються для забезпечення безпеки.
- Напруга в електромережі становить 220 В із заземленою нейтраллю.

У разі аварійних ситуацій працівник має:

- Негайно вимкнути електричне живлення та повідомити про це свого керівника або електрика.
- Надати долікарську допомогу, якщо людина отримала ураження електричним струмом.
- Викликати технічну службу у разі будь-яких відхилень у роботі обладнання або програмного забезпечення.
- Припинити роботу з ПК у разі будь-яких ознак негативного впливу на здоров'я, таких як різке погіршення зору або головний біль.
- У разі загоряння обладнання вимкнути його та повідомити про це керівника та пожежну службу, а також вжити заходів для його ліквідації за допомогою вогнегасника.

5.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1. Мікроклімат

Робота, яка виконується проектувальником, згідно за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [5]. Допустимі

параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.5.1 (відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [6]).

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення відповідних нормативам параметрів клімату у приміщенні передбачено наступне: система опалення, система кондиціонування та регулярне вологе прибирання.

Вимірювання параметрів мікроклімату проводяться на робочому місці та в робочій зоні в різні періоди робочої зміни: на початку, в середині та в кінці. Ці вимірювання здійснюються не рідше, ніж двічі на рік, включаючи теплий та холодний періоди, у межах поточного санітарного контролю. Також проводяться вимірювання при введенні в експлуатацію нового технічного обладнання, внесенні змін до конструкції діючого обладнання, створенні нових робочих місць та інших випадках.

5.2.2. Склад повітря робочої зони

Сучасна техніка використовує різні речовини, які можуть випускатися у повітря та представляти загрозу для здоров'я людей. Для визначення рівня небезпечності цих речовин проводяться дослідження їх впливу на організм людини, а також встановлюються безпечні для здоров'я концентрації та дози, які можуть потрапляти в організм різними шляхами.

Для забезпечення здорових та безпечних умов праці необхідно мати нормативні вимоги щодо шкідливих речовин, надійні методи визначення їх

концентрацій у повітрі, а також сучасне технічне та організаційне забезпечення для їх видалення.

У приміщенні, де ведеться робота, можуть бути шкідливі речовини у повітрі, такі як пил та озон, які є результатом роботи офісної техніки.

Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

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

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

Таблиця 5.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

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

Для забезпечення комфортних умов використовуються як організаційні методи, так і технічні засоби. Організаційні методи включають раціональну організацію робіт з урахуванням пори року і доби, а також чергування між роботою та відпочинком. Технічні засоби включають в себе вентиляцію, кондиціонування повітря та опалювальну систему.

5.2.3. Виробниче освітлення

Серед зовнішніх факторів, які впливають на організм людини під час праці, освітлення відіграє ключову роль. Це пояснюється тим, що близько 90% інформації про навколишнє середовище людина отримує за допомогою зору. Під час виконання будь-яких робіт очі стають втомленими, переважно через напруженість процесів, пов'язаних з зоровим сприйняттям. Такі процеси включають адаптацію, акомодацию та конвергенцію.

Світло впливає не лише на функціонування органів зору, але і на роботу всього організму. Погане освітлення може призводити до швидкої втоми, зменшення продуктивності праці, збільшення ризику помилок та нещасних випадків.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні, які необхідно забезпечити під час виконання роботи зазначені у таблиці 5.4 (відповідно ДБН В.2.5-28-2018 [7]):

Таблиця 5.4 - Норми освітленості в приміщенні

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

Для забезпечення належного освітлення виконано такі заходи:

Регулярно проводиться очищення скла від бруду не рідше двох разів на рік.

Система природного освітлення доповнюється загальним штучним освітленням, яке створюється за допомогою люмінесцентних ламп.

5.2.4. Виробничий шум

Для робочих місць в приміщеннях з комп'ютерами характерна присутність різних типів шумів, включаючи механічні (спричинені коливанням деталей машин та їх рухами), аеродинамічні (виникають у газах або рідині внаслідок пружних конструкцій) та шуми від електричних машин.

Деякі комп'ютери можуть бути потенційними джерелами різноманітних звукових коливань, як у слуховому, так і ультразвуковому діапазонах. Зазвичай рівні акустичного випромінювання, що йдуть від комп'ютерів, охоплюють частотний діапазон від 6,3 до 40 кГц.

Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку відображені в ДСН 3.3.6.037-99 [8]. Для умов виконання роботи допустимі рівні звукового тиску повинні наведені в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення прийнятних рівнів шуму рекомендується використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановлювати пластикові вікна з високою звукоізоляцією.

5.2.5. Виробничі випромінювання

Під час дослідження ефективності поєднання алгоритму interleaving та технології множинного доступу в умовах значних завад існує ризик виникнення підвищеного рівня електромагнітного поля. Негативний вплив на організм

людини мають електромагнітні випромінювання радіочастотного діапазону, які походять від телевізійних і радіомовних станцій, пристроїв стільникового зв'язку, апаратів високочастотного нагрівання та навіть побутової техніки. Електромагнітні поля можуть викликати термічні та морфологічні зміни в організмі людини, що призводить до функціональних відхилень.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітора комп'ютера представлені в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 - Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	10В / м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50см від поверхні відеомонітора	0,3 А / м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати: для дорослих користувачів для дітей дошкільних установ і що вчаться середніх спеціальних і вищих навчальних закладів	20кВ / м 15кВ / м

Для зменшення впливу цих видів випромінювання рекомендується використовувати монітори з низьким рівнем випромінювання, такі як MPR-II, TCO-92, TCO-99, TCO-03, а також дотримувати регламентовані режими роботи та відпочинку.

5.3. Пожежна безпека

Головною метою пожежної безпеки об'єкта є запобігання виникненню пожежі на рівні, визначеному чинними нормами, а в разі її виникнення – обмеження її поширення, вчасне виявлення та гасіння, а також захист людей і майна.

У приміщенні, де проводилось проектування, використовуються виключно негорючі речовини та матеріали у холодному стані, тому його класифікують як категорію "Д" за ступенем вибухопожежної та пожежної небезпеки. Щодо вогнестійкості, приміщення відносять до другої категорії. Робоча зона проектувальника віднесена до класу вибухонебезпечності В-Па, оскільки концентрація пилу і волокон, що є вибухонебезпечними, може утворюватися тільки внаслідок аварії або несправності.

5.3.1. Технічні рішення системи запобігання пожежі

Система попередження пожежі представляє собою комплекс організаційних заходів та технічних засобів, спрямованих на усунення умов, що можуть спричинити виникнення пожежі.

У дослідженому приміщенні працює відповідальна особа за пожежну безпеку. Меблі та обладнання розміщені таким чином, щоб забезпечити вільний евакуаційний прохід до дверей виходу. Евакуаційні шляхи та виходи підтримуються постійно вільними.

Документи, папір та інші горючі матеріали зберігаються на відстані не менше 1 м від електрощитів, електрозборок і електрокабелів, 0,5 м від світильників та 0,25 м від приладів опалення. Засоби протипожежного захисту, такі як пожежні крани, пожежна сигналізація та первинні засоби пожежегасіння, утримуються в справному стані.

Можливі причини виникнення пожежі у приміщенні включають несправну електропроводку (іскріння, перегрів провідників, пересихання електроізоляційних матеріалів) та використання електро побутових приладів (електрочайники, обігрівачі) або попадання вологи на працююче електрообладнання.

Для запобігання виникненню пожежі проводяться такі заходи, як щорічні протипожежні інструктажі та заняття з особами, відповідальними за пожежну безпеку; підтримання засобів протипожежного захисту в справному стані;

своєчасне повідомлення про несправності пожежної техніки, систем протипожежного захисту та водопостачання.

5.3.2. Технічні рішення системи протипожежного захисту

Система протипожежного захисту включає в себе ряд організаційних та технічних заходів, які спрямовані на запобігання впливу небезпечних факторів пожежі на людей та обмеження матеріальних збитків.

У приміщенні для обмеження розповсюдження пожежі встановлено переносний вуглекислотний вогнегасник типу ОУ-5, який відповідає встановленим нормам. Можливості для засобів первинного пожежегасіння та відключення електросхем устаткування залишаються доступними.

З метою дотримання протипожежного захисту заборонено:

- влаштовувати тимчасові електромережі та використовувати саморобні плавкі вставки в запобіжниках;
- прокладати електричні проводи безпосередньо по горючій основі;
- експлуатувати світильники без ковпаків (розсіювачів);
- використовувати саморобні подовжувачі, які не відповідають вимогам Правил улаштування електроустановок;
- прикріплювати одяг або інші предмети до вимикачів та розеток;
- обгортати електролампи та світильники;
- залишати без нагляду увімкнені в електромережу кондиціонери, комп'ютери, лічильники та друкарські машинки;
- користуватися побутовими електрокип'ятильниками та чайниками поза спеціально відведеними для цього приміщеннями;
- захарашувати доступ до засобів пожежегасіння та використовувати їх не за призначенням;
- зберігати документи, матеріали та інвентар у шафах інженерних комунікацій;
- палити поза відведеними для цього місцями;
- проводити зварювальні та інші вогневі роботи без відповідного

дозволу;

- використовувати легкозаймисті рідини.

5.4 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

Алгоритм interleaving у сукупності з технологією OFDMA є важливими елементами у безпроводних інфокомунікаційних системах. Вони покращують стійкість сигналу до завад різного походження, зокрема таких, що приводять до групових помилок. Поєднання цих алгоритмів активно використовується в сучасних безпроводних стандартах. У даній роботі питання ефективності такого поєднання розглянуті у контексті стандартів стільникового зв'язку LTE 4G та широкосмугового радіодоступу Wi-Fi 6.

Розглянуто принцип блочного перемежування бітів цифрового потоку, показано особливості реалізації інтерлівінгу в обох стандартах, у тому числі і його другого рівня – символного та частотного.

Технології LTE та Wi-Fi 6 працюють дещо у різних середовищах, тому ключове призначення алгоритму Interleaving в LTE та Wi-Fi 6 різне. У LTE алгоритм зосереджений на стійкості до багатопроменевого поширення (fading), а у Wi-Fi 6 він оптимізований для роботи в мережах з великою щільністю користувачів. У LTE має місце бітовий і часовий розподіл символів для покращення зв'язку на великих відстанях, а у Wi-Fi 6 – гнучкий бітовий та частотний розподіл для зменшення завад у локальних мережах.

Технологія множинного доступу OFDMA в обох стандартах (LTE та Wi-Fi 6) дозволяє більшій кількості користувачів одночасно працювати в тому самому каналі. Вона підвищує спектральну ефективність шляхом нарізання каналів на менші за розміром підканали. Замість очікування вільного цілого каналу, клієнтські пристрої можуть спільно використовувати невеликі його частини. Це дозволяє організувати паралельну передачу в безпроводній мережі, підвищує її загальну продуктивність та ємність.

У результаті поєднання обох зазначених технологій підвищується завадостійкість сигналу: інтерлівер розподіляє бітові помилки, тоді як OFDMA зменшує інтерференцію між користувачами. Одночасно відбувається зниження затримок: OFDMA оптимізує розподіл ресурсів, а interleaving мінімізує вплив

завад. Одночасне використання цих механізмів підвищує ефективність передачі даних у завантажених мережах, що збільшує їх пропускну здатність.

У реальних умовах експлуатації мереж LTE та Wi-Fi 6, де інтерлівінг застосовується разом із методами кодування помилок, зменшення величини BER може бути значним. У Wi-Fi 6 (802.11ax) при високій щільності користувачів і сильному багатопроменевому впливі interleaving може знизити BER у кілька разів. У LTE BER може бути знижений на 1-2 порядки величини при використанні QPSK або 16-QAM у середовищах з великими завадами (наприклад, у міських умовах).

Виконано енергетичні розрахунки висхідного та низхідного каналів системи LTE. Отримано значення максимально допустимих втрат для обох каналів, що дозволяє оптимізувати параметри системи LTE для забезпечення надійного зв'язку в умовах реального середовища. Результати цих розрахунків є важливими для ефективного проектування та експлуатації мережі LTE, забезпечуючи необхідний рівень якості зв'язку та мінімальні втрати сигналу на всіх етапах поширення.

Виконано розрахунки з питань охорони праці та безпеки життєдіяльності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бортник Г. Г. Системи передавання в електрозв'язку. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 138 с.
2. Бойко М.П. Системи стільникового зв'язку: Конспект лекцій. – Одеса: ОНАЗ, 2004. – 76с.
3. Солодовник В.І. Метод адаптивної об'єднаної прийомо–передавальної просторової модуляції для високошвидкісних систем безпроводового зв'язку / Солодовник В.І. // Збірник наукових праць ВІТІ, 2018. – № 1 – С. 126 – 140.
4. Солодовник В.І. Алгоритм адаптивної модуляції та просторового мультиплексування у багатоантенних системах безпроводового зв'язку / Солодовник В.І. // Збірник наукових праць ВІТІ, 2018. – № 3 – С. 103 – 111.
5. Бабак В.П. Обробка сигналів у радіоканалах цифрових систем передавання інформації: Навч. посібник [Текст] / В.П. Бабак, Т.М. Наритник, Ю.В. Куц, В.Я. Казимиренко. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2005. – 476 с.
6. Головін Ю.О. Основи радіозв'язку з рухомими об'єктами: навч. посіб. Київ : ІСЗЗІ НТУУ КПІ, 2016. 322 с.
7. Михалевський Д. В. Оцінка параметрів безпроводного каналу передачі інформації стандарту 802.11Wi-Fi / Д. В. Михалевський // Східно - Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 6/9 (72). – С. 22-25. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.31666.
8. Стандарт локальних мереж ієєе 802.11 wi-fi URL: <https://beloshop.ru/uk/ethernet-standard-ieee-80211-wi-fi/> – Дата доступу 18.11.2020.
9. Михалевський Д. В. Передача трафіку у мережах Wi-Fi при дії інтерференційних завад / Д. В. Михалевський, М. Д. Гузь, Р. О.Красота. – Сборник научных трудов Sword. – 2014. – №4(37) Том 5. – С. 12-17.
10. Технологія ієєе 802.11. Підтримка поточкових даних. Сумісність з іншими стандартами бездротового зв'язку [Електронний ресурс]. URL: <https://teploskat.ru/the-technology-ieee-80211/> – Дата доступу 02.12.2020.

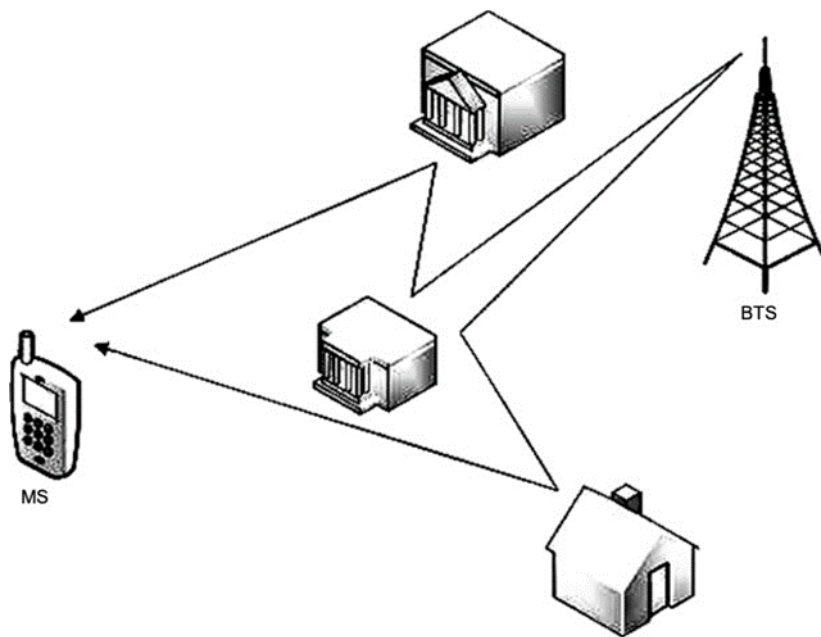
11. Ільченко М.Ю. Основи теорії телекомунікацій; навч. посібник; за заг. ред. М. Ю. Ільченка. – К.: ІСЗІ НТУУ «КПІ», 2010. – 788 с.
12. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Сучасні телекомунікаційні системи. – К. : Наук. думка, 2008. – 328 с.
13. Безпроводні технології MU-MIMO [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://habrahabr.ru/post/132247>.
14. Михалевський Д. В. Дослідження передачі інформації в умовах суміщеного та сусіднього інтерференційного каналів для стандарту 802.11n / Д. В. Михалевський, В.В. Номировська, О.М. Постернак // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.– 2015. – №2. – С. 155 – 159.
15. IEEE 802.11 «Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications» [Електронний ресурс] IEEE // Режим доступу: DOI:10.1109/ieeestd.2016.7786995 (дата звернення 11.04.2025).
16. Wi-Fi global economic value to reach \$5 trillion in 2025 [Електронний ресурс] Wi-Fi Alliance // Режим доступу: <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-global-economic-value-to-reach-5-trillion-in-2025> (дата звернення 01.03.2025).
17. Європейський інститут телекомунікаційних стандартів [Електронний ресурс] ETSI // Режим доступу: <https://www.etsi.org> (дата звернення 05.03.2025).
18. В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман. Телекомунікаційні мережі. Київ, Техніка, 2001р. – 526 с.
19. Поповський В. В. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В. В. Поповський, В. Ф. Олійник та ін.]. – Харків : СМІТ, 2006. – 564 с.

Додаток А
(обов'язковий)

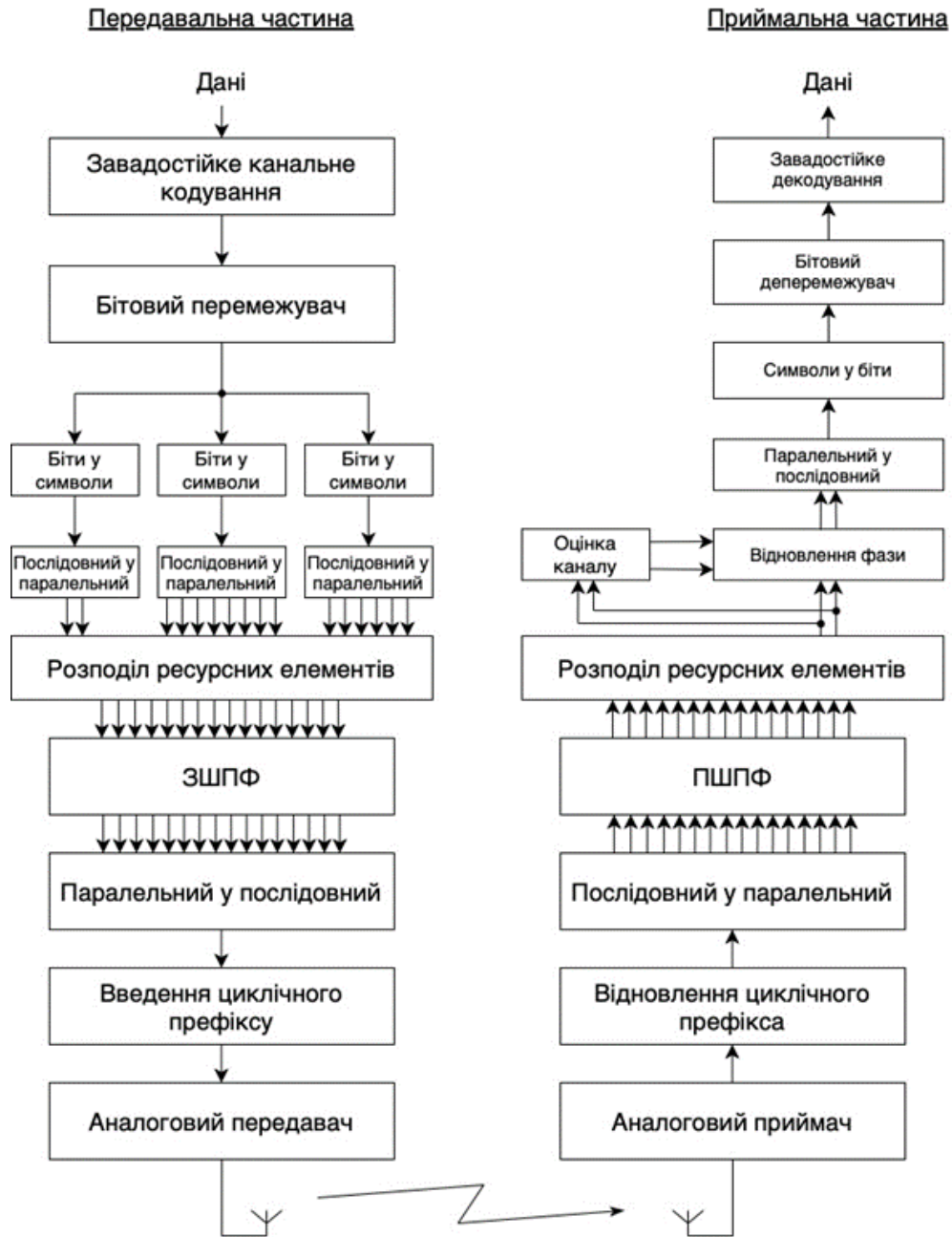
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОЄДНАННЯ АЛГОРИТМУ INTERLEAVING ТА
ТЕХНОЛОГІЇ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ В УМОВАХ ЗНАЧНИХ ЗАВАД**

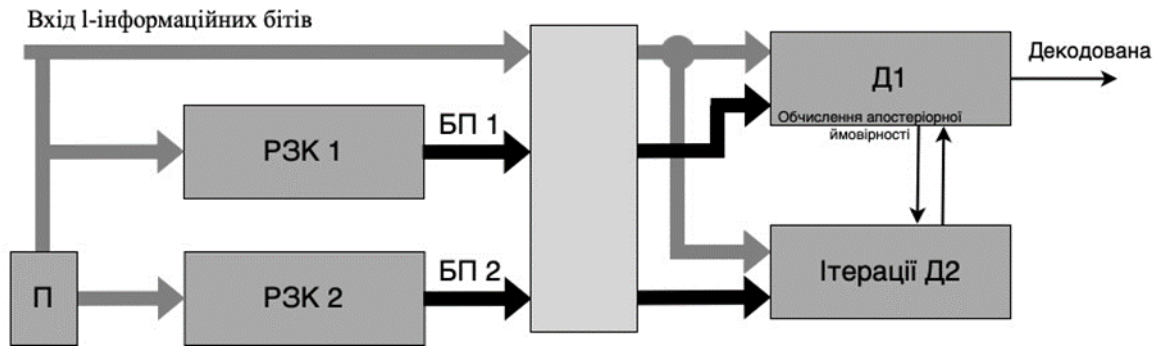
назва бакалаврської кваліфікаційної роботи



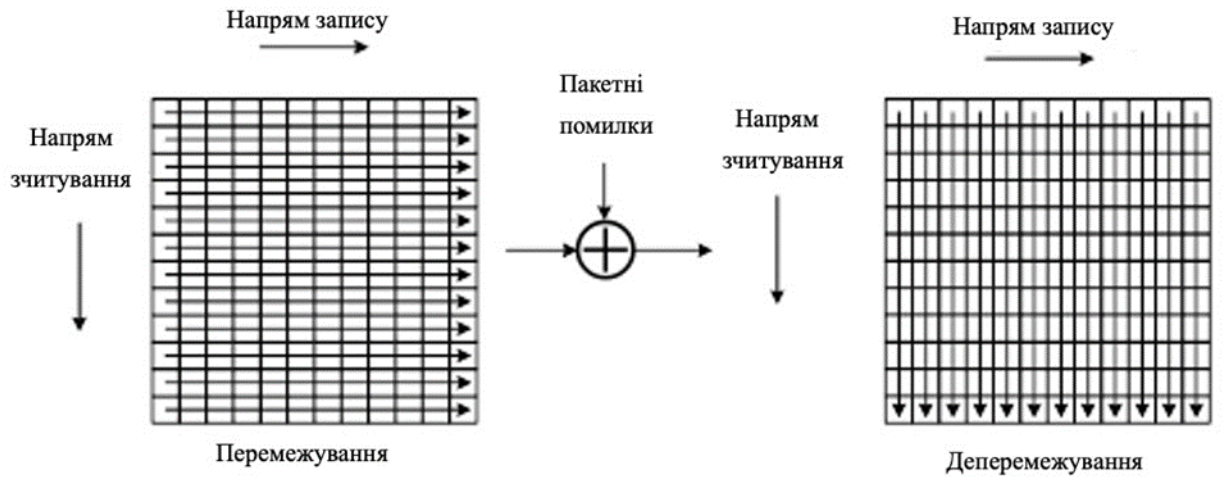
Модель багатопроменевого поширення радіосигналу



Структурна схема каналу передачі системи безпроводного зв'язку



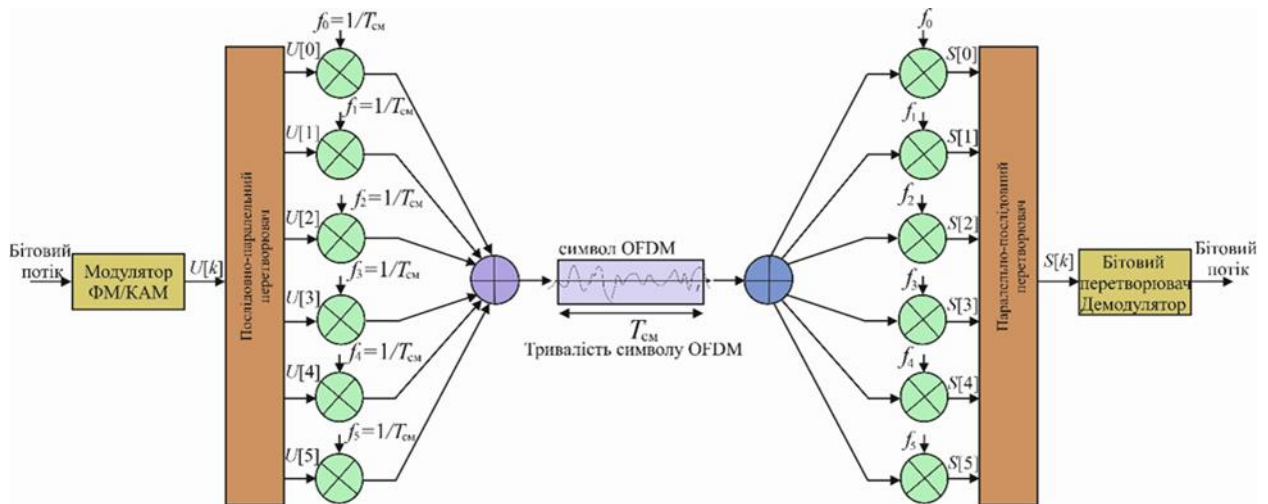
Структурна схема каналу на основі турбокодів



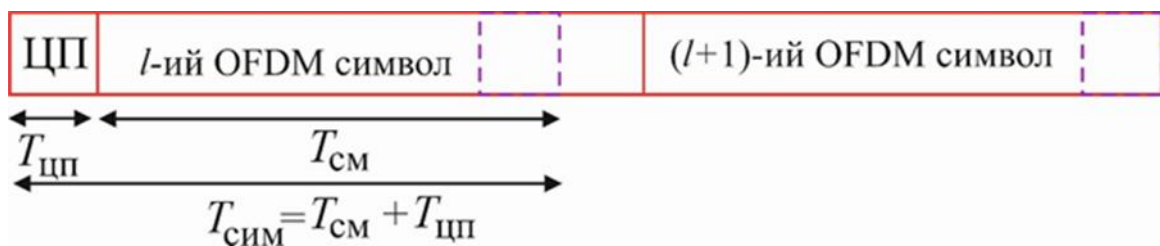
Принцип блочного перемежування та деперемежування

Основні відмінності interleaving у LTE та Wi-Fi 6

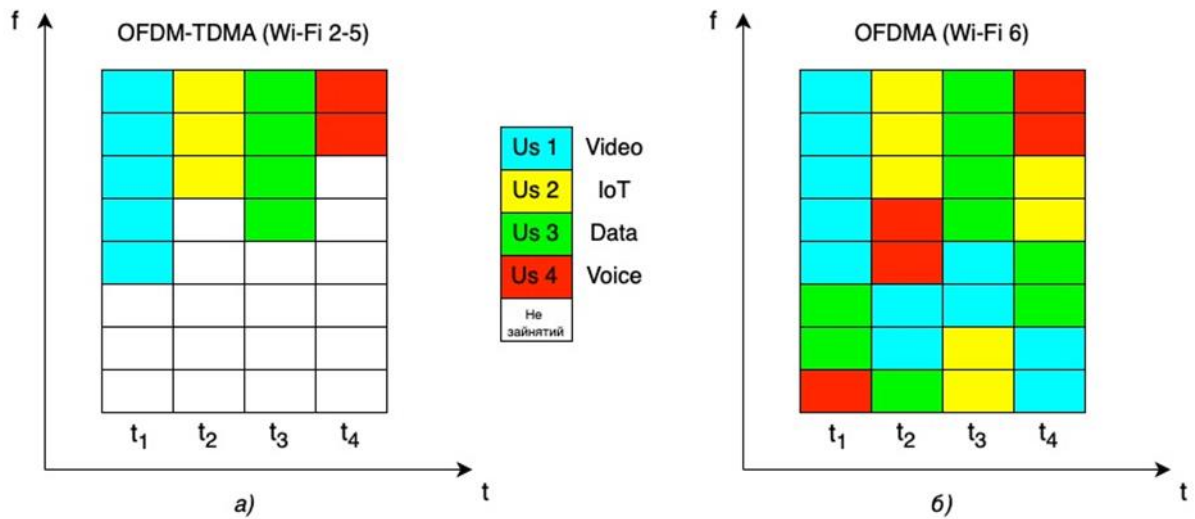
Характеристика	LTE	Wi-Fi 6
Тип кодування	Turbo-коди (3GPP) або LDPC	LDPC або BCC (Binary Convolutional Code)
Рівень реалізації	Виконується на рівні фізичного каналу (PHY) перед модуляцією	Виконується на рівні фізичного каналу (PHY) перед модуляцією
Алгоритм interleaving	Бітовий + символний інтерлівер	Бітовий + частотний інтерлівер
Залежність від модуляції	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 1024-QAM
Головна мета	Мінімізувати ефекти багатопроменевого поширення (fading)	Стійкість до завад у середовищах із багатьма користувачами
Гнучкість	Фіксований алгоритм у кожному режимі	Адаптивний, залежно від модуляції та ширини каналу
Призначення ресурсів	Динамічний розподіл ресурсних блоків (RB)	Гнучкий розподіл ресурсних одиниць (RU) в OFDMA



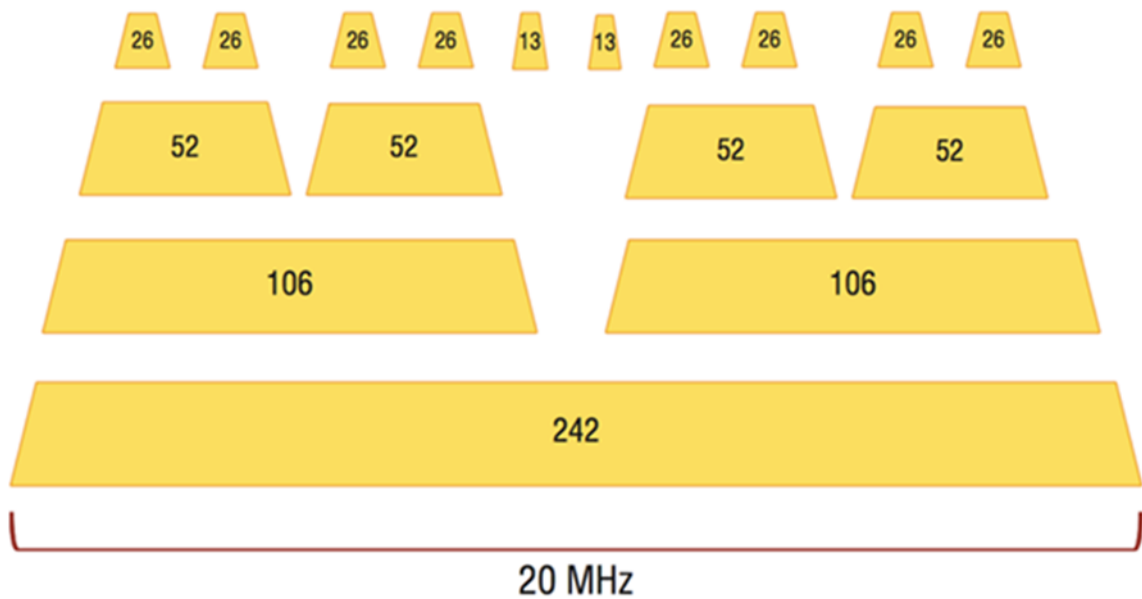
Структурна схема формування та обробки сигналів у системі OFDM



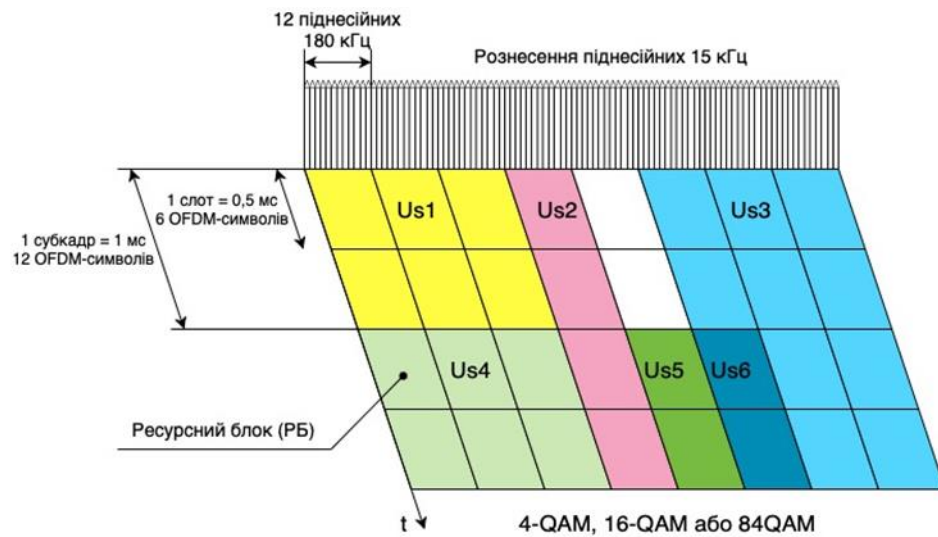
Структура OFDM-сигналу із захисним інтервалом



Розподіл каналного ресурсу:
 при послідовному обслуговуванні користувачів системами поколінь Wi-Fi 2-5;
 при паралельному обслуговуванні користувачів системою покоління Wi-Fi 6



Розподіл каналу 20 МГц на ресурсні блоки



Динамічний розподіл каналів для користувачів (Us1...Us6)

Деякі параметри DownLink-каналів системи LTE-4G

Виділена ширина смуги, МГц, B^*	1,25	3,0	5,0	10,0	15,0	20,0
Кількість ресурсних блоків, $N_{РБ}$	6	15	25	50	75	100
Ширина смуги одного РБ, кГц, $B_{РБ}$	180	180	180	180	180	180
Ширина смуги, що використовується, МГц, $B = B_{РБ} \cdot N_{РБ} < B^*$	1,08	2,7	4,5	9,0	13,5	18,0
Кількість інформаційних піднесійних (ІП) та пілотних піднесійних (ПП), $N_{ІП} + N_{ПП}$	72	180	300	600	900	1200
Кількість захисних піднесійних (ЗП), $N_{ЗП}$	56	76	212	424	636	848
Розмір ЗДПФ, $N = N_{ІП} + N_{ПП} + N_{ЗП}$	128	256	512	1024	1536	2048
Частота вибірки, МГц, $F_S^* = N \cdot \Delta f$, $\Delta f = 1/T_U = 15$ кГц	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Ефективність поєднання алгоритму interleaving та технології множинного доступу в умовах значних завад

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС, група ПЗТ-216
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 7,4 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

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

Експертна комісія:

Кичак В.М., завідувач кафедри ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Васильківський М.В., гарант ОПП

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Барась С.Т., професор кафедри ІКСТ

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Поліщук Ю. О.

(прізвище, ініціали)