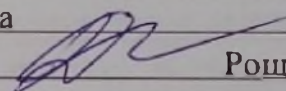


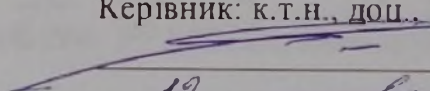
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

СПЕЦІАЛЬНІ АЛГОРИТМИ РОБОТИ БЕЗПРОВІДНИХ СИСТЕМ
ПРИ ВІДСУТНОСТІ ПРЯМОЇ ВИДИМОСТІ NLOS

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

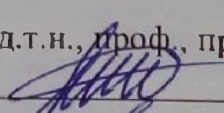

Рощаховський Д. І.

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


Барась С. Т.

« 12 » червня 2025 р.

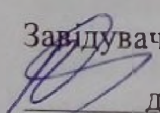
Рецензент: д.т.н., проф., професор каф. ІРТС


Семенов А.О.

« 12 » червня 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ


д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 12 » червня 2025 р.

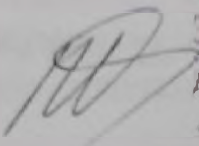
Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

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
«05» 05 2025 року

З А В Д А Н Н Я **НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

Рощачовському Денису Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Спеціальні алгоритми роботи безпроводних систем при відсутності прямої видимості NLOS

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

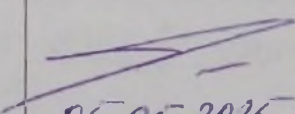
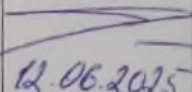
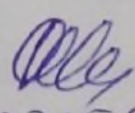
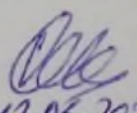
2. Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: багатопроменеве поширення радіохвиль при відсутності прямої видимості, адаптація тривалості циклічного префікса у межах (1/4-1/32) тривалості символу OFDM, діапазон частот (500-5000) МГц, діапазон змін рівня швидких завмирань – до 40 дБ, повільних – (5-10)дБ, типовий час затримки для умов офісу становить (20-200) нс, в умовах міської забудови – (5-10) мкс, в сільській місцевості – до 0,2 мс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, аналіз напрямків забезпечення ефективної роботи безпроводних систем в умовах NLOS, технологія OFDM (OFDMA), алгоритми beamforming та interleaving, технології рознесення прийому, завадостійкість системи (моделювання), охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Багатопроменеве поширення сигналу. Ілюстрація міжсимвольної інтерференції. Структурна схема формувача OFDM-радіосигналу за допомогою зворотного швидкого перетворення Фур'є (ЗШПФ). Розподіл каналного ресурсу. До пояснення технології beamforming. Приклад дії перемежування (interleaving). Графіки ймовірності помилок системи зв'язку при передаванні сигналів.

6. Консультанти розділів роботи

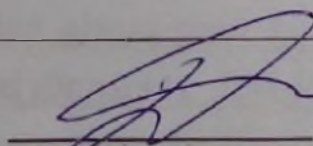
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Барась С. Т., професор кафедри ІКСТ	 05.05.2025	 12.06.2025
Охорона праці	Дембіцька С.В., професор каф. БЖДПБ	 05.05.2025	 12.06.2025

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

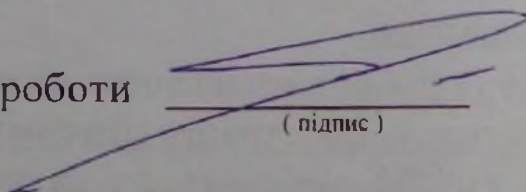
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	06.05.2025р.	
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	19.05.2025р.	
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)

Рощаховський Д. І.

Керівник роботи


(підпис)

Барась С. Т.

АНОТАЦІЯ

УДК 681.324

Рощаховський Д. І. Спеціальні алгоритми роботи безпроводних систем при відсутності прямої видимості NLOS. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – програмне забезпечення телекомунікаційних систем. Вінниця: ВНТУ, 2025. 85 с. На укр. мові. Бібліогр.: 31 назв; рис.: 24; табл. 12.

Робота присвячена дослідженню спеціальних алгоритмів роботи безпроводних систем, які забезпечують надійну передачу даних, мінімізацію затримок та високу інформаційну швидкість в умовах багатопроменевого поширення хвиль.

Метою дослідження є підвищення ефективності спеціальних алгоритмів роботи безпроводних систем в умовах відсутності прямої видимості між передавачем та приймачем..

Основними завданнями роботи є аналіз можливих напрямків забезпечення ефективної роботи безпроводних систем в умовах NLOS, оцінка ефективності технологій ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням та множинного доступу з ортогональним частотним розділенням каналів, аналіз ефективності алогоритмів beamforming та interleaving та оцінка технологій рознесеного прийому.

Робота містить шість розділів. У першому розділі виконано дослідження впливу багатопроменевості на структуру сигналів та проведено аналіз напрямків забезпечення ефективної роботи безпроводних систем в умовах NLOS.

У другому розділі дана оцінка ефективності технологій ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням та множинного доступу з ортогональним частотним розділенням каналів.

У третьому розділі проведено аналіз ефективності алогоритмів beamforming та interleaving.

У четвертому розділі дана оцінка технологій рознесеного прийому.

У п'ятому розділі наведено результати моделювання завадостійкості системи з релеївськими каналами передачі.

У шостому розділі виконано розрахунки, які стосуються охорони праці та безпеки життєдіяльності.

Ключові слова: безпроводні системи, алгоритми, пряма видимість, завадостійкість, охорона праці.

ABSTRACT

Roschakhovsky D. I. Special algorithms for wireless systems in the absence of direct visibility NLOS. Bachelor's qualification work in specialty 172 - telecommunications and radio engineering, educational program - software for telecommunications systems. Vinnytsia: VNTU, 2025. 85 p.

In Ukrainian. Bibliography: 31 titles; fig 24; tab. 12.

The work is devoted to the study of special algorithms for wireless systems that ensure reliable data transmission, minimization of delays and high information speed in conditions of multi-path propagation of waves.

The purpose of the study is to improve the efficiency of special algorithms for wireless systems in conditions of no direct visibility between the transmitter and the receiver.

The main tasks of the work are to analyze possible directions for ensuring the effective operation of wireless systems in NLOS conditions, to evaluate the efficiency of orthogonal frequency division multiplexing and orthogonal frequency division multiplexing channel multiplexing technologies, to analyze the efficiency of beamforming and interleaving algorithms, and to evaluate diversity reception technologies.

The work contains six sections. In the first section, a study of the impact of multipath on the signal structure was performed and an analysis of directions for ensuring the effective operation of wireless systems in NLOS conditions was conducted.

In the second section, an assessment of the efficiency of orthogonal frequency division multiplexing and orthogonal frequency division multiplexing channel multiplexing technologies was performed.

In the third section, an analysis of the efficiency of beamforming and interleaving algorithms was performed.

In the fourth section, an assessment of diversity reception technologies was performed.

The fifth section presents the results of modeling the noise immunity of a system with Rayleigh transmission channels.

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

Keywords: wireless systems, algorithms, line of sight, interference immunity, occupational safety

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ БЕЗПРОВІДНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ NLOS	7
1.1 Характеристика умов роботи	8
1.1.1 Канали з завмираннями... ..	8
1.1.2 Аналітика вхідного сигналу	10
1.1.3 Інтерференція	13
1.2 Огляд напрямків забезпечення ефективної роботи в умовах NL.....	17
1.3 Висновки до розділу	20
2 ТЕХНОЛОГІЯ OFDM (OFDMA).....	21
2.1 Концепція OFDM	21
2.2 Множинний доступ з ортогональним частотним розділенням каналів	25
2.3 Ефективність алгоритму OFDMA в умовах NLOS.....	29
2.4 Висновки до розділу	31
3 АЛГОРИТМИ BEAMFORMING ТА INTERLEAVING	32
3.1 Адаптивне формування направленої сигналу beamforming.....	32
3.2 Ефективність алгоритму interleaving.....	35
3.3 Висновки до розділу	37
4 ТЕХНОЛОГІЇ РОЗНЕСЕНОГО ПРИЙОМУ	39
4.1 Просторове рознесення.....	40
4.2 Частотне рознесення	40
4.3 Часове рознесення	40
4.4 Багатопроменеве рознесення	41
4.4.1 Загальна характеристика	41
4.4.2 Багатопроменевий прийом складених сигналів.....	42
4.5 Висновки до розділу	52
5 ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ СИСТЕМИ (МОДЕЛЮВАННЯ)	53

5.1 Завадостійкість системи зв'язку за відсутності багатопроменевих спотворень.....	53
5.2 Завадостійкість системи зв'язку при передачі сигналів через релеївські канали	54
5.3 Висновки до розділу	59
6 ОХОРОНА ПРАЦІ	60
6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	61
6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	64
6.2.1 Мікроклімат	64
6.2.2 Склад повітря робочої зони.....	65
6.2.3 Виробниче освітлення.....	66
6.2.4 Виробничий шум.....	67
6.2.5 Виробничі випромінювання.....	68
6.3 Пожежна безпека.....	69
6.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі	70
6.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	70
6.4 Висновки до розділу	70
ВИСНОВКИ	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74
Додаток А (обов'язковий). Ілюстративний матеріал.....	77
Додаток Б (обов'язковий). Протокол перевірки кваліфікаційної роботи	85

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AP – Access Point (точка доступу)

CP – cyclic prefix (циклічний префікс)

CSI - Channel State Indication/Information (стан каналу)

ISI - inter symbol interference (міжсимвольна інтерференція)

MIMO - multiple-input multiple-output (системи зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами)

MU-MIMO– Multi-User Multiple Input Multiple Output (багатокористувальницька технологія з декількома входами)

NLOS - Non-Line-of-Sight (відсутність прямої видимості)

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing (ортогональне частотне розділення з мультиплексуванням)

OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access (множинний доступ з ортогональним розділенням каналів)

QAM – Quadrature Amplitude Modulation (квадратурно-амплітудна модуляція)

QPSK – Quadrature Phase Shift Keying (квадратурна фазова маніпуляція)

RSIS - received signal strength indicator (показник рівня вхідного сигналу)

SISO - Single Input Single Output (система з одним входом і одним виходом)

STA - **Station mode** (безпроводна станція)

SU-MIMO – Single-User Multiple Input Multiple (однокористувальницька система)

ГДК - гранично допустима концентрація

ЗДПФ – зворотне дискретне перетворення Фур'є

ЕМП - електромагнітне поле

КПО – коефіцієнт природного освітлення

ПК – персональний комп'ютер

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

ФНЧ – фільтр низьких частот

ВСТУП

Актуальність теми. Радіоканал у безпроводних системах характеризується багатопроменим поширенням радіохвиль, що означає, що сигнал, який досягає приймача, складається не лише з компонента прямої видимості, але й з численних відбитих хвиль, які надходять із різними затримками. Такі запізнені сигнали виникають внаслідок відбиття від об'єктів, як-от дерева, гори, транспортні засоби чи великі будівлі.

У безпроводному зв'язку приймач реєструє сигнали з різних джерел, які можуть взаємодіяти між собою, спричиняючи викривлення інформації. До таких спотворень, викликаних багатопроменистістю, належать затримки сигналу, втрати його потужності та розширення частотного спектру. Передача може відбуватися як за наявності прямої видимості (LOS), так і в умовах її відсутності (NLOS) [1-4].

Швидкі коливання сигналу в середовищі NLOS, що є наслідком багатопроменового поширення, описуються релєївським розподілом і відомі як релєївські завмирання. Амплітуда сигналу може змінюватися до 40 дБ. Повільні завмирання, викликані рельєфом місцевості та ефектами затінення, описуються логарифмічно нормальним законом, а їхня інтенсивність зазвичай не перевищує 5-10 дБ. Ці завмирання відображають зміни середнього рівня сигналу внаслідок руху та рефракції, накладаючись на швидкі завмирання, спричинені багатопроменистістю. У стільниковому зв'язку найбільш критичними є швидкі завмирання, оскільки вони суттєво знижують відношення сигнал/шум, що може призводити до втрати корисної інформації [3, 5].

Такі особливості поширення сигналу ускладнюють його обробку та викликають спотворення переданої інформації. Це вимагає застосування відповідних технічних рішень, зокрема оптимізації структури системи та використання спеціалізованого програмного забезпечення для забезпечення ефективної роботи в умовах NLOS. Отже, дослідження ефективності спеціальних алгоритмів функціонування безпроводних систем у таких умовах та

їх удосконалення є актуальним завданням. У межах цієї роботи розглядаються такі алгоритми та технології: OFDM і OFDMA, beamforming, interleaving, а також технології рознесеного прийому, зокрема алгоритм багатопроменевого прийому складених сигналів.

Аналіз останніх досліджень. Одночасно з розробкою нових стандартів і технологій, що підвищують швидкість передачі даних, проводяться дослідження нових принципів організації зв'язку. Один з них — безпроводні самоорганізуючі мережі, які мають функцію адаптації до умов роботи. Мова йде про використання таких технологій та алгоритмів, які забезпечують надійну роботу телекомунікаційних систем при великій кількості абонентів, в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль, при значній завадовій обстановці тощо. Сучасні досягнення у цьому напрямку спираються на технологію OFDMA, процедуру інтерлівінгу, технології багатопроменевого прийому та райк-приймачі, використання адаптивних антенних систем [4 – 5].

Мета та постановка задачі. Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності спеціальних алгоритмів роботи безпроводних систем в умовах відсутності прямої видимості між передавачем та приймачем.

Задачами бакалаврської кваліфікаційної роботи є:

- аналіз напрямків забезпечення ефективної роботи безпроводних систем в умовах NLOS;
- оцінка ефективності технологій ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням та множинного доступу з ортогональним частотним розділенням каналів;
- аналіз ефективності алгоритмів beamforming та interleaving;
- розгляд та оцінка технологій рознесеного прийому;
- оцінка завадостійкості системи з релеївськими каналами передачі;
- охорона праці та безпека життєдіяльності.

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

1 АНАЛІЗ НАПРЯМКІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ БЕЗПРОВІДНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ NLOS

NLOS (Non-Line-of-Sight) — це умови, за яких між передавачем і приймачем немає прямого візуального контакту. Це відбувається через наявність перешкод, таких як будівлі, стіни, особливості рельєфу або інші об'єкти, що блокують або розсіюють сигнал. Умови NLOS характерні для різних середовищ і можуть значно впливати на якість безпроводного зв'язку.

NLOS-умови виникають у разі, коли фізичні об'єкти заважають проходженню сигналу безпосередньо від передавача до приймача. До таких перешкод належать будівлі, дерева, транспортні засоби та природні утворення, що спричиняють багатопроменеве поширення сигналу (Multipath Fading). У результаті сигнал досягає приймача різними маршрутами, що може призводити до інтерференції, затримок і ускладнень при декодуванні.

Ефективність роботи безпроводних систем у NLOS-умовах залежить від частоти сигналу. Вищі частоти є більш чутливими до перешкод і втрат при поширенні без прямої видимості. Крім того, динамічні зміни в середовищі, зокрема рух транспорту чи людей, можуть спричиняти додаткові коливання сигналу, що позначається на стабільності зв'язку. Атмосферні явища, такі як дощ, туман чи сніг, також впливають на розсіювання сигналу, спричиняючи втрати енергії, які можуть змінюватися залежно від часу та траєкторії поширення хвиль.

Для мінімізації впливу NLOS-умов та покращення стабільності зв'язку розробляються спеціальні технології та алгоритми. У подальшому розглянемо особливості каналів передачі сигналів та проаналізуємо можливі підходи до підвищення ефективності роботи безпроводних систем зв'язку в умовах відсутності прямої видимості.

1.1 Характеристика умов роботи

1.1.1 Канали з завмираннями

Завмирання сигналу — це процес, що проявляється у зміні його обвідної. Обвідна сигналу — це функція, яка визначається за його характерними точками, наприклад, екстремумами. Дослідимо її поведінку в умовах багатопроменевого поширення хвиль. $U_s(t)$ для сигналу $s(t)$ визначається як модуль аналітичного сигналу [8]:

$$U_s(t) = |Z_s(t)| = \sqrt{S^2(t) + \hat{S}^2(t)} \quad (1.1)$$

Під час проходження через радіозв'язкові канали сигнал зазнає різноманітних змін, однією з основних причин яких є багатопроменеве поширення. На своєму шляху від передавача до приймача сигнал взаємодіє з перешкодами, відбивається від них, у результаті чого утворюються кілька його копій із різними затримками та рівнями згасання. Це і є суть багатопроменевого поширення.

У приймальній антені накладаються численні електромагнітні хвилі з різними затримками, амплітудами та фазами, що призводить до їх суперпозиції та спричиняє амплітудні й фазові спотворення сигналу. Якщо сума цих сигналів матиме значну енергію (незалежно від того, чи вони є корисними, чи завадовими), це може збільшити рівень помилок і погіршити якість каналу зв'язку. Це явище називається завмиранням сигналу, оскільки у певні моменти часу здається, що сигнал перестає передаватися між джерелом та приймачем.

Завмирання сигналу поділяють на два основні типи: швидкі та повільні. Повільні завмирання зазвичай спричинені змінами навколишнього середовища, зокрема несприятливими погодними умовами. Швидкі завмирання виникають унаслідок руху приймача або передавача, а також через наявність перешкод на шляху сигналу. Вони є частотно-селективними, тобто зміна частоти передачі може зменшити або навіть повністю усунути їхній вплив [9].

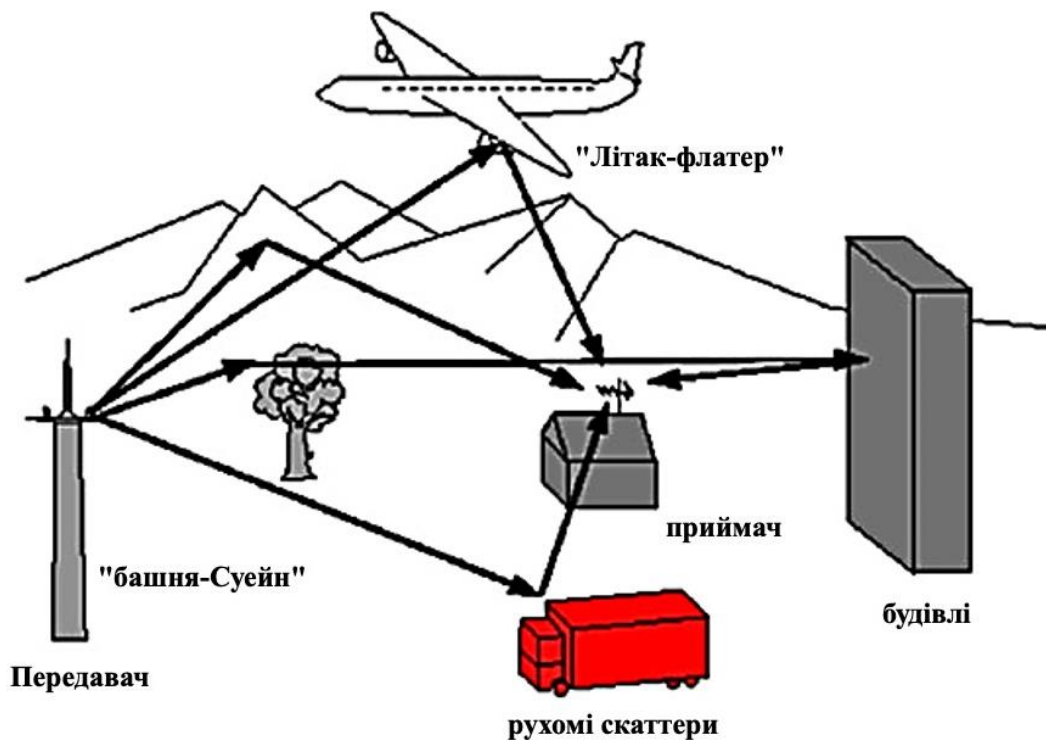


Рисунок 1.1 – Багатопроменеве поширення сигналу

На рисунку 1.1 схематично показано багатопроменеве поширення сигналу. З нього видно, що існують різні шляхи, якими сигнал може досягати приймача. Для кожного з цих шляхів існують свої характеристики: $d_1, d_2, d_3, \dots$ - довжини траєкторій (ломані лінії); $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ - згасання сигналів; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$ - фази сигналів.

Існують два види завмирань: Релея та Райса. Завмирання Релея виникають, коли немає прямого променя з нульовою затримкою на приймальній стороні – очевидно, це умови NLOS. У цьому випадку обвідну сигналу описує розподіл Релея:

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1.2)$$

де r – амплітуда обвідної вхідного сигналу; σ^2 – середня енергія сигналу.

Якщо на приймальній стороні присутній прямий промінь з нульовою затримкою, то це завмирання Райса. Зміни обвідної у цьому випадку описує розподіл Райса:

$$p_{Ri}(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2+s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left[\frac{rs}{\sigma^2}\right], \quad (1.3)$$

де I_0 - модифікована функція Бесселя, а s - амплітуда постійної складової сигналу [8, 9].

Відбиття та заломлення радіохвиль виникають в міських районах через наявність високих будівель та інших споруд. Ці обставини можуть викликати багатопроменеве поширення сигналів і створити відповідні проблеми.

1.1.2 Аналітика вхідного сигналу

У мобільних безпроводних мережах приймач обробляє сигнали, що надходять різними шляхами. Частина з них виникає внаслідок відбиття від близько розташованих об'єктів, тоді як інші сигнали формуються через дифракцію на сусідніх перешкодах. Оскільки різні промені досягають приймача з різними фазами та амплітудами, їх взаємодія може призводити до інтерференції, що спричиняє спотворення сигналу та ускладнює передачу інформації.

До основних спотворень, пов'язаних із багатопроменевістю, належать затримки сигналу, втрати потужності та розширення частотного спектру. Випадкові зміни характеристик каналу зв'язку в часі можна змодельовати як вузькосмуговий випадковий процес.

При наявності великої кількості відбитих хвиль, що досягають приймальної антени, розподіл сигналу можна описати комплексним гаусівським випадковим процесом відповідно до центральної граничної теореми. Обвідна прийнятого сигналу складається з швидких флуктуацій, накладених на повільні зміни. Якщо середня амплітуда обвідної зменшується через фазові зсуви інтерферуючих променів, сигнал вважається таким, що завмирає.

Поняття «багатопроменевість» означає, що на антену надходять кілька копій одного й того ж сигналу з різними характеристиками. Багатопроменевий канал можна описати статистично, використовуючи його кореляційну функцію [6, 9].

Переданий сигнал може бути змодельований як вузькосмуговий процес:

$$s(t) = x(t)e^{-2\pi f_c t}. \quad (1.4)$$

У багатопроменевому каналі розсіювачі зазвичай вважаються гаусівськими, а канал характеризується змінними затримками, доплерівськими зсувами та коефіцієнтами згасання. Змінний у часі імпульсний відгук каналу може бути виражений наступним співвідношенням:

$$h(\tau_n, t) = \sum_n \alpha_n(\tau_n, t) e^{-2\pi f_{Dn} \tau_n(t)} \delta[t - \tau_n(t)], \quad (1.5)$$

де $h(\tau_n, t)$ – відгук сигналу в момент часу t на імпульсний вплив у момент часу $[t - \tau_n(t)]$; $\alpha_n(t)$ – коефіцієнт згасання сигналу, який прийнятий по n -ому променю; $\tau_n(t)$ – затримка поширення для n -го променя; f_{Dn} – доплерівський зсув для сигналу, прийнятого по n -ому променю.

Відносний рух передавача та приймача призводить до доплерівського зсуву частоти це наслідок, який може бути виражений як:

$$f_{Dn} = \frac{v \cos(\theta_n)}{\lambda}, \quad (1.6)$$

де v – відносна швидкість руху між приймачем та передавачем; λ - довжина несійної хвилі; θ_n - кут між напрямками переміщення та приходу променя.

Сигнал на виході каналу зв'язку з урахуванням його параметрів описується співвідношенням:

$$z(t) = h(\tau_n, t) \cdot s(t) = \sum_n \alpha_n \cdot \tau_n(t) e^{-2\pi(f_c + f_{Dn})\tau_n(t)} x[t - \tau_n(t)] e^{-j2\pi f_c t}, \quad (1.7)$$

$$\text{де } \delta[t - \tau_n(t)] \cdot x(t) = x[t - \tau_n(t)]; \delta[t - \tau_n(t)] \cdot e^{-j2\pi f_c t} = e^{-j2\pi f_c (t - \tau_n(t))}. \quad (1.8)$$

Для $z(t)$ існує інша форма:

$$z(t) = \sum_n \beta_n \cdot x[t - \tau_n(t)] e^{-j2\pi f_c t}, \quad (1.9)$$

де $\beta_n = \alpha_n \cdot \tau_n(t) e^{-2\pi(f_c + f_{Dn})\tau_n(t)}$ – гаусівський випадковий процес.

Розподіл Релея має обвідна функція каналного відгуку $h(\tau_n, t)$, оскільки відгук каналу є гаусівським випадковим процесом. Якщо розглядати щільність ймовірності коефіцієнта передачі каналу з релеївськими завмираннями, то вона визначається формулою:

$$f_z(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right). \quad (1.10)$$

NLOS-канал (відсутність прямої видимості) зазвичай вважається каналом з релеївськими завмираннями. При наявності між приймачем і передавачем прямої видимості (LOS), канал характеризується розподілом Райса:

$$f_z(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2 + \mu^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left[\frac{z\mu}{\sigma^2}\right], \quad (1.11)$$

де $I_0(\dots)$ — модифікована функція Бесселя нульового порядку, а μ та σ^2 - середнє значення та дисперсія променя прямої видимості відповідно.

Функція автокореляції каналу зв'язку, який має імпульсний відгук $h(\tau, t)$, визначається таким чином:

$$R_c(\tau, \Delta t) = E[h(\tau, t) \cdot h^*(\tau, t + \Delta t)]. \quad (1.12)$$

Цю функцію можна виміряти, передаючи дуже вузькі імпульси та вимірюючи взаємну кореляцію прийнятого сигналу з його затриманою версією. Середню потужність каналу можна знайти при $\Delta t = 0$, тобто $R_c(\tau, 0) = R_c(\tau)$. Ця характеристика називається профілем затримки потужності або профілем багатопроменевої інтенсивності.

Діапазон значень τ , для яких автокореляційна функція $R_c(\tau)$ не дорівнює нулю, іноді називають багатопроменим розсіюванням затримки каналу і позначають як τ_m . Зворотна до значення багатопроменевого розсіювання величина затримки є мірою когерентності каналу:

$$B_m \approx \frac{1}{\tau_m}. \quad (1.13)$$

Діапазон когерентності каналу відіграє ключову роль у системах зв'язку. Якщо ширина спектра передаваного сигналу значно менша за когерентний діапазон каналу, виникають плоскі (частотно неселективні) завмирання. Це спрощує обробку сигналу на приймальному боці. У разі, коли спектр сигналу перевищує цей діапазон, система стикається з частотно-селективними завмираннями, що ускладнює правильне відновлення сигналу приймачем.

Канали, в яких статистичні характеристики залишаються сталими протягом кількох символів, називаються каналами з повільними завмираннями. Якщо ж ці характеристики змінюються швидко в межах символічного інтервалу, канал характеризується швидкими завмираннями. Умови поширення сигналу всередині приміщень зазвичай спричиняють повільні частотно-селективні завмирання [10].

1.1.3 Інтерференція

В умовах багатопроменевого поширення один і той самий сигнал може досягати приймача кількома маршрутами, які мають різну довжину. Це спричиняє нерівномірне затухання сигналу. У результаті на приймальному боці

формується сумарний сигнал, що є накладанням кількох сигналів з різними амплітудами, часовими зсувами та фазами.

Багатопроменеве поширення викликає спотворення сигналу, що негативно впливає на його якість, особливо у випадку широкосмугової передачі. Внаслідок інтерференції окремі частоти можуть підсилюватися при синфазному складанні або ж ослаблюватися через протифазну взаємодію.

При аналізі багатопроменевого поширення виділяють два крайні випадки:

- Якщо максимальна затримка між сигналами менша за тривалість одного символу, виникає внутрішньосимвольна інтерференція, коли символи з однаковими параметрами перекриваються та взаємодіють між собою.
- Якщо максимальна затримка перевищує тривалість символу, накладаються сигнали, що відповідають різним символам, що призводить до міжсимвольної інтерференції (ISI). У таких випадках відбувається змішування символів, що спричиняє значні спотворення.

Міжсимвольна інтерференція є однією з найбільш критичних проблем у цифрових системах зв'язку, оскільки ускладнює коректне відновлення початкового сигналу. Для її зменшення можна використовувати часове рознесення між символами, однак це знижує швидкість передавання даних.

Технологія OFDM пропонує ефективне рішення для мінімізації міжсимвольної інтерференції, одночасно забезпечуючи високу спектральну ефективність. Вона використовує множину піднесучих частот і збільшує тривалість символу, що зберігає ортогональність сигналів упродовж довшого періоду. Додатково вводиться захисний інтервал (Guard Interval, GI), який зменшує вплив багатопроменевих затримок, що ілюструється на рисунку 1.2.

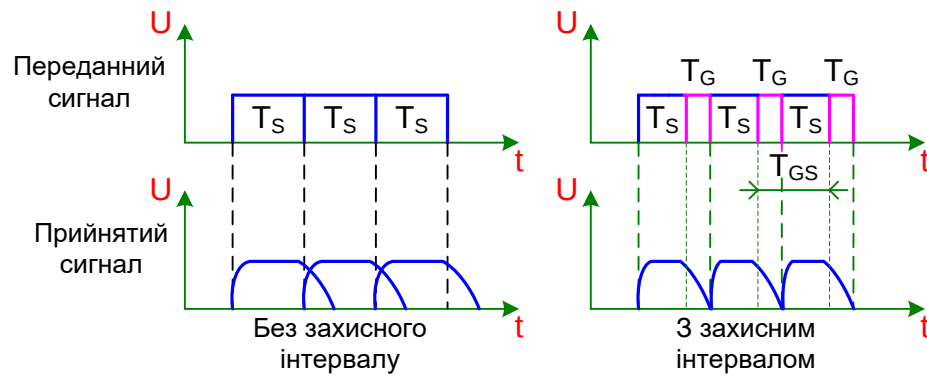


Рисунок 1.2 – Призначення захисного інтервалу

У межах захисного інтервалу передається повторення початкової частини символу, ніби відтворене у зворотному часовому порядку. Це призводить до збільшення загальної тривалості символу, оскільки він включає дві складові:

$$T_{GS} = T_G + T_S, \quad (1.14)$$

де T_{GS} - час, що витрачається на передачу одного символу;

T_G – захисний інтервал;

T_S – час передачі корисної інформації.

На рисунку 1.3 схематично показаний процес формування повного символу, що включає активний символ (інформативну частину) і захисний інтервал, як циклічне розширення у часі.

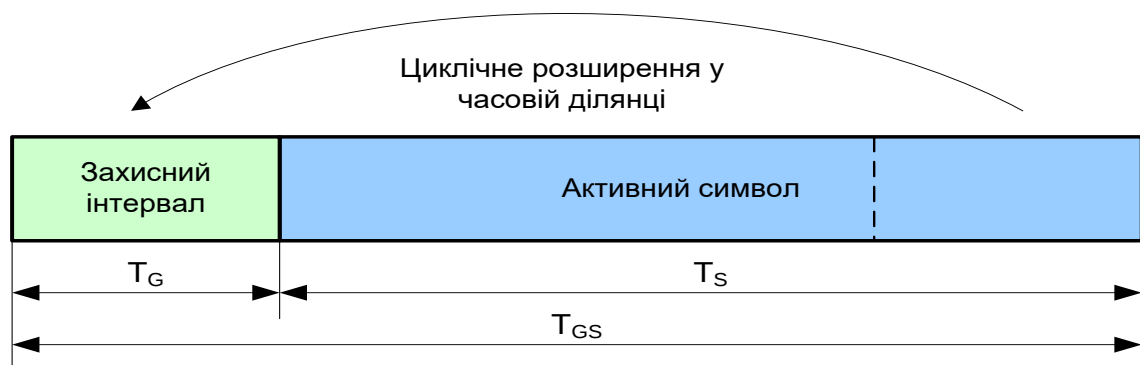


Рисунок 1.3 – Формування повного символу

Тривалість захисного інтервалу визначає ефективність усунення міжсимвольної інтерференції в певних межах. Вона може бути адаптивною, оскільки зазвичай обирається відповідно до умов функціонування системи. На рисунку 1.4 показано часові інтервали сусідніх символів, що ілюструють виникнення міжсимвольної інтерференції внаслідок їх взаємного накладання через затримки.

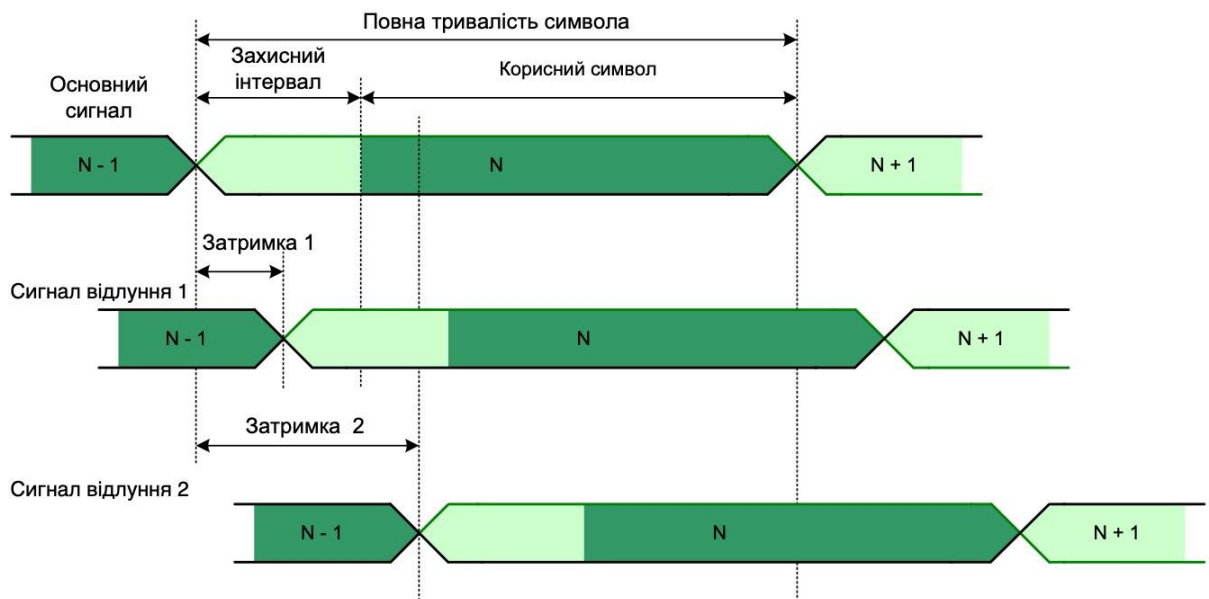


Рисунок 1.4 – Ілюстрація міжсимвольної інтерференції

Як показано на рисунку, затримка першого відбитого сигналу залишається в межах допустимого діапазону. Перехідні процеси між двома символами відбуваються всередині захисного інтервалу основного сигналу, що не впливає на його корисну частину. Однак другий відбитий сигнал має настільки велику затримку, що його перехідна зона перекриває частину корисного інтервалу основного сигналу, що свідчить про недостатній рівень захисту. На рисунку 1.5 продемонстровано взаємодію кількох відбитих сигналів та формування прийнятого сигналу без спотворень завдяки використанню захисного інтервалу. Крім основного сигналу, зображено відбиті сигнали (відлуння 1 і 2), а також сигнал сусіднього передавача одночастотної мережі (відлуння 3).

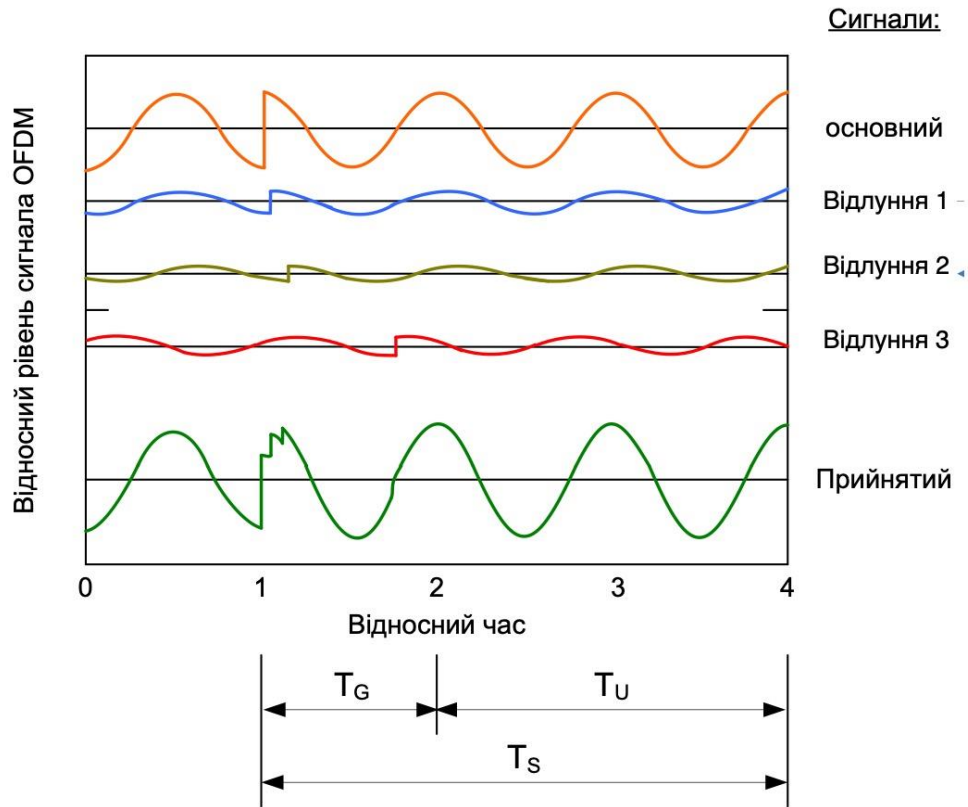


Рисунок 1.5 – Ілюстрація доцільності захисного інтервалу

До приймача надходить сума чотирьох сигналів. Якщо тривалість захисного інтервалу T_G перевищує час імпульсної реакції каналу або затримку поширення сигналу, рівень міжсимвольної інтерференції (МСІ) значно знижується, оскільки всі перехідні процеси небажаних сигналів завершуються в межах цього інтервалу. Водночас, навіть за наявності захисного інтервалу, можлива залишкова інтерференція між піднесучими частотами.

1.2 Огляд напрямків забезпечення ефективної роботи в умовах NLOS

Вище була дана стисла характеристика умов NLOS, коли відсутні прямі видимі лінії між передавачем і приймачем і де різноманітні перешкоди можуть впливати на передачу сигналу. У таких умовах важливо врахувати різноманітні технічні та конструктивні аспекти для ефективного функціонування систем

зв'язку, зокрема широкосмугових систем. Розглянемо напрямки проектування, які можуть підвищити ефективність роботи в умовах NLOS.

Таких напрямків насправді немало. Частину з них просто зазначимо, а іншу частину, яка зазвичай потребує спеціального програмного забезпечення, розглянемо у даній роботі детальніше.

Використання технології OFDM. Ортогональне частотне розділення з мультиплексуванням (OFDM) є ефективним підходом для умов NLOS, оскільки дозволяє ділити сигнал на підканали, що може допомогти подолати втрати сигналу. Однією з ключових переваг OFDM є захист від міжсимвольної інтерференції, що зазвичай супроводжує багатопроменеве поширення.

Алгоритми «beamforming» та «interleaving». Beamforming — це техніка, яка дозволяє спрямовувати енергію сигналу в певному напрямку, підвищуючи ефективність зв'язку. При роботі в умовах NLOS, beamforming може бути корисним для компенсації відбитих або багатопромених сигналів, оскільки він дозволяє фокусувати сигнал на найбільш ймовірних шляхах прийому. Використання декількох антен або направлених антен дозволяє зменшити вплив шуму та відбиттів, покращуючи якість зв'язку в умовах, коли безпосередня лінія видимості між передавачем і приймачем відсутня.

Interleaving — це техніка обробки даних, яка полягає в перерозподілі бітів чи символів перед передачею для зменшення впливу сплесків шуму або завад, особливо в умовах багатопромених каналів, що характерно для NLOS-середовища. Interleaving дозволяє спростити відновлення даних у разі часткових втрат або помилок під час передачі, що зменшує ймовірність серйозних спотворень у прийнятих даних.

У багатьох каналах зв'язку, зокрема в каналах із завмираннями, спотворення фази та амплітуди проявляються одночасно, що може призводити до розсіювання імпульсів. Методи обробки сигналів, спрямовані на усунення чи зниження цих ефектів, називаються «вирівнюванням», і для цього використовуються різні типи еквалайзерів.

Анени з високим коефіцієнтом підсилення. Використання антен з великим коефіцієнтом підсилення може підвищити здатність приймача отримувати сигнал через перешкоди. Проте це рішення може бути обмеженим через вплив на складність і габарити антенних систем.

Системи «розумних» антен (адаптивні антенні системи). Системи з "розумними" антенами можуть автоматично визначати оптимальний напрямок для прийому сигналу. Це технічне рішення також може мати певні обмеження, але, безсумнівно, може бути корисним у ситуаціях без прямої видимості.

Використання протоколів автоматичного повторення запиту (ARQ) і завадокоригуючих кодів (FEC) може допомогти відновити дані, втрачені чи пошкоджені через перешкоди. Ці алгоритмічні рішення базуються на системах зі зворотним зв'язком, які аналізують прийнятий сигнал і, у разі необхідності, повторно передають його.

Технології рознесеного прийому або розгалуження шляхів - застосування технік розгалуження шляхів дозволяє використовувати кілька маршрутів для передачі та отримання сигналу, що допомагає подолати втрати сигналу через перешкоди. Такі технології будуються як просторове, частотне, часове та багатопромєневе рознесення.

Управління потужністю та частотою. Автоматичне регулювання потужності та частоти може бути корисним для адаптації до змін у середовищі та мінімізації впливу перешкод. Мережеві рішення для забезпечення надійності полягають у використанні мережевих рішень, таких як резервування маршрутів та мережеві протоколи, що може підвищити надійність в умовах, коли деякі маршрути можуть бути заблоковані.

Дана робота торкатиметься найважливіших методів забезпечення ефективної роботи в умовах NLOS – таких як технологія OFDM, алгоритми beamforming та interleaving, а також зазначених вище технологій рознесеного прийому.

1.3 Висновки до розділу

Проведено аналітику при багатопробеновому поширенні сигналу в умовах відсутності прямого сигналу між передавачем і приймачем (NLOS) та при наявності такого сигналу (LOS). Показано, що для NLOS розподіл амплітуди обвідної підпорядковується закону Релея, а для LOS - закону Райса.

Описано принцип визначення багатопробенового розсіювання затримки каналу та його зворотного значення — когерентності каналу, яка має важливе значення в системах зв'язку. При невеликій ширині спектру сигналу по відношенню до діапазону когерентності каналу в системі виникають плоскі завмирання (або частотно неселективні завмирання). Якщо ширина спектра сигналу велика відносно смуги когерентності, то система стикається з частотно-селективними завмираннями, які ускладнюють прийом сигналу.

Також розглянуто канали, які мають постійну статистику протягом кількох символних інтервалів, які класифікуються як канали з повільними завмираннями, на відміну від тих, чия статистика змінюється швидко.

Показано причини та механізм виникнення внутрішньосимвольної та міжсимвольної інтерференції, а також їх вплив на спотворення інформації та методи боротьби з цими явищами. Визначено напрямки забезпечення ефективної передачі даних в безпроводних мережах зв'язку в умовах відсутності прямої видимості.

2 ТЕХНОЛОГІЯ OFDM (OFDMA)

2.1 Концепція OFDM

Технологія OFDM (ортогональне частотне мультиплексування) є методом модуляції, що одночасно використовує кілька несійних частот із взаємно ортогональним мультиплексуванням. Основна ідея OFDM полягає в тому, щоб розподілити вхідний цифровий потік, представлений послідовністю бітів, на паралельні підпотоки, кожен з яких передається через окрему несійну частоту. Це дозволяє знизити швидкість передачі інформації на кожній несійній, подовжуючи тривалість символу та зменшуючи вплив багатопроменевого поширення, що є характерним для міських умов.

На рисунку 2.1 зображено, як послідовний цифровий сигнал розділяється на п'ять окремих потоків за допомогою демультимплексування. Це збільшує тривалість передачі кожного символу у п'ять разів. Кожен із цих потоків, зменшених за швидкістю передачі, використовується для модуляції відповідної несучої частоти. Кількість несучих відповідає числу модулюючих сигналів, а для кожної з них застосовується фазова модуляція (PSK) або квадратурна амплітудна модуляція (QAM).

При виборі несійних частот необхідно враховувати такі аспекти [14]:

- їхня кількість має бути достатньою, щоб при збереженні загальної швидкості потоку даних забезпечити необхідну тривалість символу на кожній несучій;
- несучі частоти повинні бути розташовані максимально близько одна до одної, щоб мінімізувати ширину смуги частот каналу зв'язку;
- важливо дотримуватись їхньої ортогональності, щоб уникнути міжканальної інтерференції.

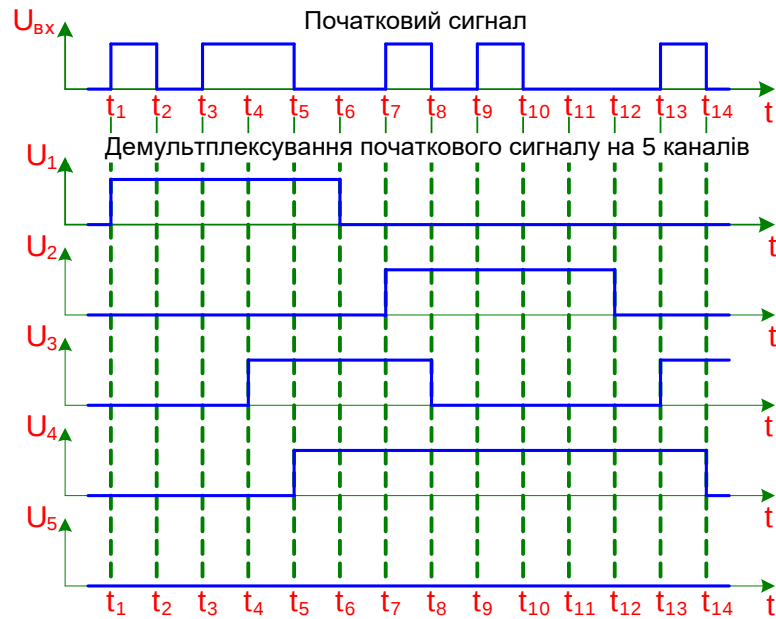


Рисунок 2.1 – Приклад демультплексування цифрового потоку

Дотримання умови ортогональності означає, що скалярний добуток двох гармонійних коливань дорівнює нулю, що можна математично виразити відповідною формулою. Якщо скалярний добуток між піднесучими частотами дорівнює нулю, це означає відсутність їх взаємного впливу, що запобігає міжканальній інтерференції. Завдяки щільнішому розташуванню частот, OFDM забезпечує значно вищу спектральну ефективність порівняно з традиційними методами частотної модуляції.

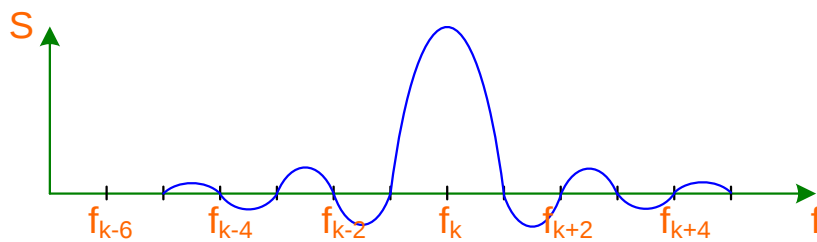


Рисунок 2.2 – Обвідна спектра однієї несучої з номером k
при модуляції сигналом прямокутної форми

Ортогональність у цьому контексті означає, що спектр кожної несучої після модуляції повинен мати нульові значення на частотах інших несучих.

Дотримання цієї умови гарантує відсутність взаємних перешкод і забезпечує незалежну передачу інформації на кожній піднесучій, що усуває міжканальну інтерференцію.

На рисунку 2.2 зображено спектр окремої несучої, промодульованої сигналом прямокутної форми [14]. Частоти несучих розташовуються вздовж осі частот із кроком, оберненим до тривалості символу T_s , що впливає з умови ортогональності. Таким чином, значення кожної частоти визначаються за наступним виразом:

$$f_k = f_0 + k \frac{1}{T_s}, \quad (2.1)$$

де $k = 0, 1, 2, \dots, n - 1, N$.

Частоти несійних у OFDM-сигналі розташовуються рівномірно з постійним кроком, що формує загальний спектр, наближений до прямокутної форми. Це свідчить про ефективне використання частотного ресурсу каналу передачі.

На рисунку 2.3 представлено спектр OFDM-сигналу, що складається з N несійних. Важливим фактором для уникнення міжканальної інтерференції є правильний вибір частот несійних. Вони розташовуються таким чином, що їх значення збігаються з точками нульових перетинів спектрів сусідніх несійних, що можна побачити на рисунку 2.3.

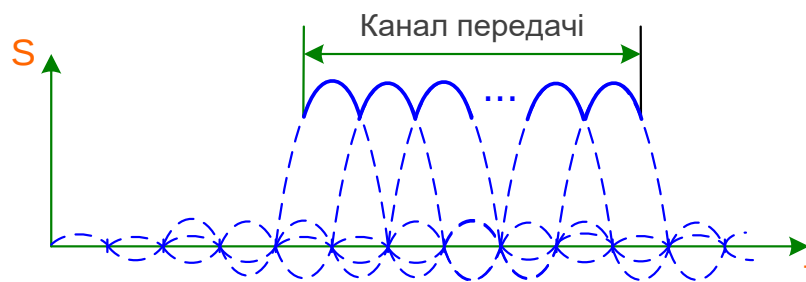


Рисунок 2.3 – Спектр OFDM-сигналу

Структурна схема модулятора OFDM у спрощеному вигляді показана на рисунку 2.4.

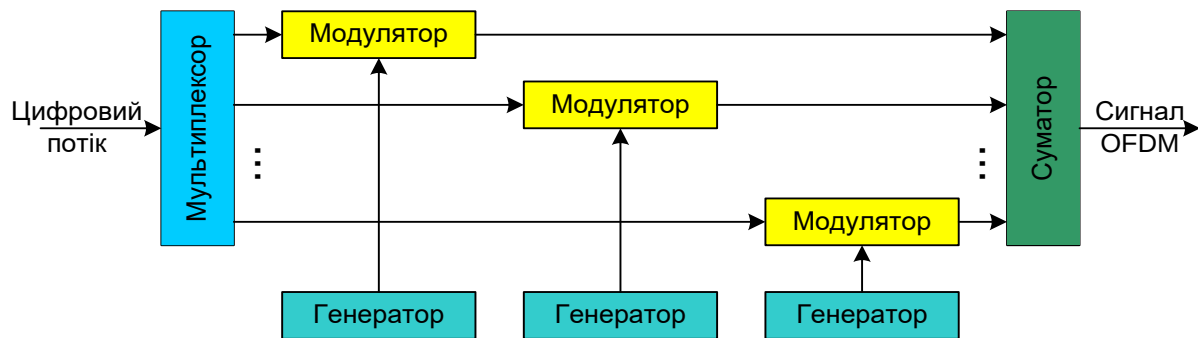


Рисунок 2.4 – Спрощена структурна схема OFDM-модулятора

Несучі частоти можуть генеруватися окремими генераторами, що є доцільним для OFDM-систем із невеликою кількістю несучих. Проте, коли їх кількість сягає кількох тисяч, використання такої схеми стає надто складним. Тому при розробці модулятора було знайдено альтернативне рішення, яке дозволяє уникнути створення багатоканальної системи генерації сигналів.

У радіотехніці застосовується метод синтезу складного сигналу з окремих гармонійних компонентів, що реалізується за допомогою зворотного перетворення Фур'є. Це дозволяє відтворювати сигнал у часовій області на основі його спектрального складу. Сучасні алгоритми забезпечують швидке виконання таких перетворень з мінімальними обчислювальними витратами.

На рисунку 2.5 представлено формування OFDM-сигналу за допомогою зворотного швидкого перетворення Фур'є (ЗШПФ). Після виконання ЗШПФ отримані дійсна та уявна складові сигналу проходять через цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) та фільтр низьких частот (ФНЧ) для усунення високочастотних компонентів. Далі ці сигнали подаються на перетворювач частоти, де вони множаться на синфазний і квадратурний гармонійні сигнали з частотою f_0 . Це дозволяє отримати OFDM-спектр, зсунений на частоту f_0 , що після сумування відповідає частотному перетворенню, необхідному для

формування радіосигналу в заданому каналі. На виході суматора формується OFDM-радіосигнал, який фактично розташовується на проміжній частоті, що відповідає частоті передачі каналу.

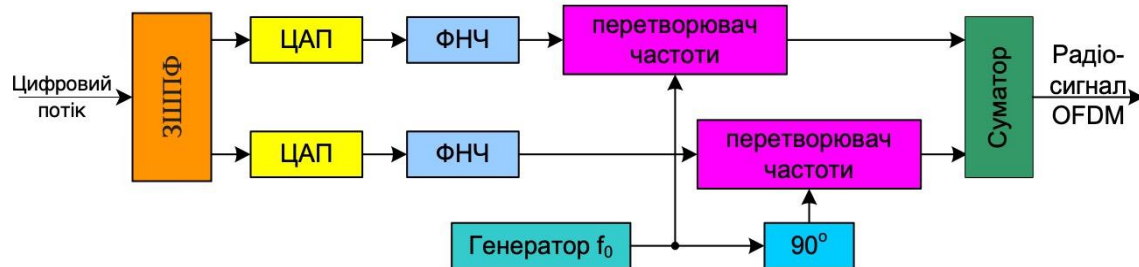


Рисунок 2.5 – Формування OFDM-радіосигналу за допомогою зворотного швидкого перетворення Фур'є (ЗШПФ)

Таким чином, OFDM-радіосигнал (символ) формується як статична сигнальна структура з фіксованими параметрами, значення яких визначаються конфігурацією данихого сигналу. В умовах непрямой видимості (NLOS) ключовим фактором є те, що тривалість символу значно перевищує тривалість тактового інтервалу сигналу даних. Це дає змогу додати захисний інтервал (префікс) достатньої тривалості, що в більшості випадків дозволяє ефективно усунути міжсимвольну інтерференцію. Детальний розгляд цього механізму наведено у попередньому розділі.

2.2 Множинний доступ з ортогональним частотним розділенням каналів

Це технологія OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), яка використовується у багатьох стандартах радіозв'язку. OFDMA є версією OFDM, оптимізованою для багатокористувацького доступу, що підвищує продуктивність мережі. Ці технології – OFDM та OFDMA – використовують розбивку даних на кілька невеликих пакетів, що дозволяє ефективно передавати інформацію.

Сигнал OFDMA формується шляхом розбиття доступного спектру частот на декілька піднесійних частот (субнесійних), які потім використовуються різними користувачами для одночасної передачі даних. Це технологія, яка дозволяє ефективно використовувати частотний спектр у багатокористувацьких системах зв'язку, таких як мобільні мережі 4G і 5G.

Основні етапи формування сигналу OFDMA.

1. Розбиття спектру. Спектр частот поділяється на багато піднесійних частот, кожна з яких є ортогональною до інших. Це дозволяє уникнути інтерференції між ними, навіть якщо вони перекриваються.

2. Модуляція на піднесійних. Кожен користувач передає свої дані на окремих піднесійних частотах за допомогою різних схем модуляції (наприклад, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM).

3. Розподіл піднесійних серед користувачів. OFDMA поділяє канал на менші блоки частот, які називаються ресурсними блоками (РБ). Точка доступу може спілкуватися з кількома клієнтами, призначаючи їм конкретні РБ. Кількість піднесійних частот, яку використовує користувач, може бути змінною і залежить від вимог до швидкості передачі та умов каналу.

4. Кодування і перетворення у часову область. Після того, як дані користувача модулюються на піднесійних частотах, вони перетворюються з частотної області на часову за допомогою перетворення Фур'є (IFFT — зворотне швидке перетворення Фур'є).

5. Додавання циклічного префікса. Для запобігання інтерференції між символами в часі (міжсимвольна інтерференція) додається циклічний префікс (СР). Цей префікс — це копія кінців символу, яка вставляється на початок кожного символу OFDMA.

6. Передача сигналу. Після формування сигналу у часовій області його передають через канал зв'язку.

7. Прийом і демодуляція. На приймальній стороні сигнал відновлюється, циклічний префікс видаляється, сигнал перетворюється назад у частотну область

за допомогою перетворення Фур'є (FFT), і здійснюється демодуляція для відновлення переданих даних.

Видно, що алгоритми OFDM та OFDMA дуже близькі, але між ними є різниця. Вона стосується переважно способу використання частотного спектру.

OFDM — це метод множинного доступу, який дозволяє ефективно передавати дані по каналу з низьким рівнем інтерференції, використовуючи багато піднесійних частот, що ортогональні одна одній. У OFDM всі піднесійні частоти використовуються одним користувачем для передачі своїх даних. Це означає, що весь доступний спектр частот, розбитий на піднесійні, використовується для однієї передачі. Усе частотне середовище призначене для одного користувача. Використовується в Wi-Fi (802.11a/g/n/ac) і LTE (як частина загального процесу).

OFDMA — це розширення OFDM, яке дозволяє кільком користувачам одночасно використовувати різні частини спектру, підвищуючи ефективність використання частотних ресурсів у багатокористувацьких системах. У OFDMA частотний спектр поділяється на окремі групи піднесійних частот (ресурсні блоки), і кожному користувачеві призначається свій РБ для передачі своїх даних. Таким чином, кілька користувачів можуть передавати дані одночасно, кожен на своїх частотах. OFDMA підтримує багатокористувацький доступ, де кожен користувач має свої піднесійні частоти (можливо, навіть на кожному символі часу), що дозволяє уникнути змагання за ресурси. Використовується в сучасних мобільних мережах, таких як 4G LTE та 5G, де багато користувачів одночасно можуть використовувати різні частини спектру.

Отже, OFDM — це технологія для ефективної передачі даних по одному каналу з використанням ортогональних піднесійних частот для одного користувача. OFDMA — це розширення OFDM, яке дозволяє кільком користувачам одночасно використовувати різні піднесійні частоти, що дає змогу ефективно організовувати доступ до ресурсу в багатокористувацьких середовищах.

Кількість РБ, призначених для кожного клієнта, визначається залежно від обмежень пристрою, вимог якості обслуговування (QoS) та розміру пакетів. Ця гнучкість у плануванні разом із паралельністю OFDMA підвищує ефективність використання часу передачі в ефірі. Це дозволяє більшій кількості користувачів отримувати більші обсяги даних із меншою затримкою та меншою ймовірністю погіршення якості сигналу через перенасиченість мережі.

Переваги технології OFDMA, впровадженої у стандарт безпроводного зв'язку Wi-Fi 6, порівняно з OFDM-TDMA, що використовувалася у стандартах Wi-Fi 2-5, демонструються на рисунках 2.6, а, б. Точки доступу стандартів Wi-Fi 2-5 можуть працювати лише з одним користувачем у певний момент часу, тоді як інші користувачі змушені чекати своєї черги. Точка доступу стандарту Wi-Fi 6, завдяки розподілу каналу на підканалі, може обслуговувати одночасно багатьох користувачів (теоретично – до 74-х при смузі 160 МГц). На практиці ж, при використанні смуги 20 МГц, зазвичай обслуговується до 9 користувачів. Вважається, що технологія OFDMA дозволила збільшити швидкість стандарту Wi-Fi 6 у 3-6 разів у порівнянні з попередніми поколіннями (Wi-Fi 2-5).

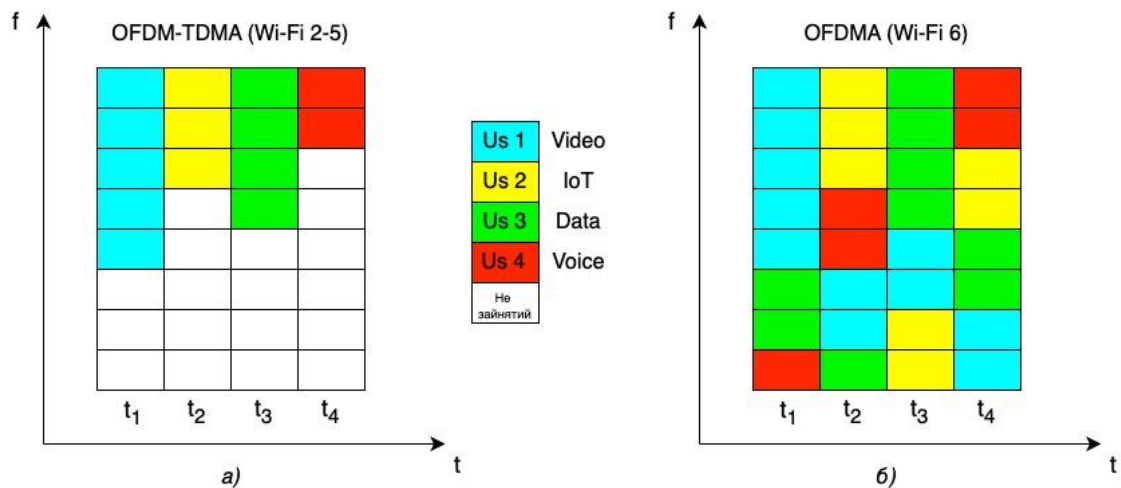


Рисунок 2.6 – Розподіл каналного ресурсу:

- а) при послідовному обслуговуванні користувачів системами Wi-Fi 2-5;
- б) при паралельному обслуговуванні користувачів системами Wi-Fi 6

Принцип використання піднесійних у OFDMA аналогічний до OFDM, проте їхня щільність значно вища. У OFDMA піднесійні розташовані вчетверо ближче одна до одної, що дозволяє збільшити їхню кількість у чотири рази. Для порівняння: OFDM використовує 64 піднесучі з рознесенням 312,5 кГц, тоді як OFDMA оперує 256 піднесучими з рознесенням 78,125 кГц.

Передача даних на піднесійних здійснюється у вигляді серії модульованих шаблонів, які називаються символами. Кожен символ кодує певну комбінацію нулів і одиниць за допомогою квадратурної амплітудної модуляції (QAM). Часовий інтервал, необхідний для передачі одного символу, називається часом символу. В OFDM символи тривають 3,2 мкс, тоді як в OFDMA цей показник у чотири рази більший — 12,8 мкс. Завдяки цьому збільшенню з'являється можливість реалізації додаткових функцій, зокрема MU-OFDMA (багатокористувацького OFDMA).

Окрім підвищення продуктивності мережі шляхом одночасної передачі даних кільком користувачам без використання нестабільних підмножин піднесійних, OFDMA також зменшує вплив завмирань сигналу, спричинених багатопроменевим поширенням. Це досягається шляхом використання частотних стрибків під час передачі, що підвищує надійність зв'язку.

2.3 Ефективність алгоритму OFDMA в умовах NLOS

Алгоритм OFDMA демонструє високу ефективність в умовах NLOS, що робить його ключовою технологією сучасних мобільних мереж, зокрема 4G LTE та 5G. Його здатність мінімізувати міжсимвольну інтерференцію та забезпечувати стабільну передачу даних у складних умовах пояснюється кількома ключовими факторами.

Стійкість до багатопроменевого поширення. У середовищі NLOS сигнал зазнає численних відбиттів від різних поверхонь, що призводить до отримання приймачем кількох версій сигналу з різними затримками. OFDMA ефективно компенсує ці ефекти завдяки широкому спектру піднесучих частот, збільшеній

тривалості символу та використанню захисного інтервалу (циклічного префіксу). Ортогональність піднесучих мінімізує інтерференцію між перевідбитими сигналами, покращуючи якість зв'язку.

Динамічний розподіл ресурсів. OFDMA дозволяє гнучко розподіляти піднесійні між користувачами відповідно до умов каналу в реальному часі. Якщо якість каналу для конкретного користувача погіршується через NLOS, система може переналаштувати розподіл ресурсів, виділяючи менш критичні частоти або перерозподіляючи ресурси від інших користувачів, що підвищує ефективність передачі.

Оптимальне використання частотного спектра. Завдяки можливості мультиплексування в частотній області кілька користувачів можуть одночасно передавати дані на різних частотах. Це дозволяє OFDMA ефективно використовувати спектр навіть у складних умовах зв'язку, таких як відсутність прямої видимості.

Адаптивна модуляція. В OFDMA для кожної піднесійної частоти може застосовуватися різна схема модуляції залежно від стану каналу. Це дозволяє динамічно змінювати параметри передачі для підвищення надійності зв'язку. Наприклад, при погіршенні умов (NLOS) можна використовувати модуляцію з нижчим порядком (BPSK або QPSK), що зменшує ймовірність помилок.

Інтерференція та корекція помилок. OFDMA містить вбудовані механізми зменшення інтерференції та виправлення помилок, зокрема циклічний префікс та коди корекції помилок. Вони знижують вплив завад і забезпечують стабільність зв'язку навіть у складних умовах поширення сигналу.

Таким чином, OFDMA є високоефективною технологією для роботи в умовах NLOS, оскільки вона забезпечує надійну передачу даних, адаптується до змін у навколишньому середовищі та зменшує негативний вплив багатоприменовості. Гнучке керування піднесучими частотами та адаптивна модуляція сприяють збереженню високої продуктивності мережі навіть у несприятливих умовах.

2.4 Висновки до розділу

Розглянуто концепцію технологій ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням OFDM та множинного доступу з ортогональним частотним розділенням каналів OFDMA. Це близькі алгоритми за процедурою формування сигналів та найбільш ефективні для роботи в умовах NLOS.

В обох технологіях використання множини піднесійних частот, на кожній з яких передається окремий блок даних, потребує послідовно-паралельного перетворення цифрового потоку. Це вимагає збільшення тривалості сформованого символу, що у свою чергу створює передумови для уникнення міжсимвольної інтерференції як через велику тривалість сигналу, так і через можливість введення захисного проміжку (циклічного префіксу).

Показано, що на кожній піднесійній може застосовуватися своя схема модуляції залежно від рівня селективної завади, причому це відбувається адаптивно.

В технології OFDMA кількість ресурсних блоків зі своїми піднесійними, призначених для кожного клієнта, визначається залежно від обмежень пристрою, вимог якості обслуговування (QoS) та розміру пакетів. Ця гнучкість у плануванні разом із паралельністю OFDMA підвищує ефективність використання часу передачі в ефірі. Це дозволяє більшій кількості користувачів отримувати більші обсяги даних із меншою затримкою та меншою ймовірністю погіршення якості сигналу через перенасиченість мережі.

3 АЛГОРИТМИ BEAMFORMING ТА INTERLEAVING

3.1 Адаптивне формування направленої сигналу beamforming

Beamforming, або Transmit Beamforming (TxBF), – це метод управління діаграмою спрямованості антенної решітки на основі інтерференції хвиль. Коли дві чи більше хвилі накладаються одна на одну, у певному напрямку відбувається підсилення результуючого сигналу, а в інших – його послаблення. Ця технологія ефективно реалізується в цифрових антенних решітках завдяки ваговій обробці сигналів, що дозволяє адаптивно налаштовувати зону покриття бездротової мережі.

Beamforming динамічно коригує спрямованість антен, оптимізуючи зону покриття точки доступу залежно від розташування клієнтів. Починаючи зі стандарту 802.11n, ця технологія стала частиною Wi-Fi, а в 802.11ac її використання стало обов'язковим.

Основна функція beamforming – фокусування сигналу на безпроводних станціях (STA), спрямовуючи радіохвилі у потрібні напрями. Це покращує рівень прийнятого сигналу (RSIS) та збільшує пропускну здатність, що особливо важливо для сучасних Wi-Fi-мереж.

Взаємозв'язок Beamforming та MIMO. Технологія MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output), яка була впроваджена в Wi-Fi 4 (802.11n), дозволяє досягати високих швидкостей передачі завдяки використанню декількох антен. Однак, більшість клієнтських пристроїв (STA) мають лише одну або дві антени, що створює дисбаланс між передачею та прийомом сигналів.

Коли STA передає дані, точка доступу (AP) може використовувати кілька антен для покращення прийому. Проте, якщо під час зворотної передачі AP використовує лише антену, відповідну до STA, можливості підсилення сигналу залишаються нереалізованими.

Beamforming вирішує цю проблему, дозволяючи AP та STA досягати більш високих швидкостей передачі та покращувати якість зв'язку. Завдяки цьому

сигнал стає більш спрямованим, що мінімізує втрати потужності та покращує стійкість зв'язку навіть у складних умовах мережевого середовища.

У стандарті Wi-Fi 5 (802.11ac) для ефективного використання багатоканальних ресурсів була впроваджена технологія MU-MIMO (Multi-User MIMO). Вона дозволяє точці доступу одночасно передавати дані кільком STA, що підвищує продуктивність бездротового з'єднання. MU-MIMO ґрунтується на технології beamforming, яка оптимально комбінує сигнали з декількох антен точки доступу. Це дозволяє кожному STA отримувати лише свої сигнали, мінімізуючи взаємні перешкоди. У Wi-Fi 6 (802.11ax) підтримка MU-MIMO була розширена, що стало можливим завдяки подальшому вдосконаленню beamforming.

Роботу beamforming можна порівняти зі світловими променями. Наприклад, якщо направити два ліхтарі в одну точку, їхнє світло накладеться, посилюючи яскравість і змінюючи форму світлового променя. Чим більше джерел світла та чим точніше вони налаштовані, тим сильніше контроль над інтенсивністю та напрямком променя.

Аналогічно, у безпроводному зв'язку антени випромінюють радіосигнали. Використання декількох антен дозволяє змінювати форму радіохвиль шляхом керування фазами й амплітудами сигналів, які вони передають. Якщо сигнали з різних антен доходять до точки прийому з однаковими амплітудами, але протилежними фазами, вони можуть взаємно придушуватися. Технологія beamforming запобігає цьому, попередньо коригуючи фази переданих сигналів, щоб вони підсилювали один одного в заданих напрямках.

На рисунку 3.1 (верхній) зображено явище повного придушення сигналу в точці прийому STA, коли сигнали від антен А та В мають протилежні фази. Нижній рисунок (рис. 3.1) демонструє зворотний випадок – підсилення сигналу в STA завдяки синфазному додаванню хвиль. Цей ефект лежить в основі beamforming, що дозволяє сфокусувати радіосигнал на конкретному STA, покращуючи якість з'єднання та ефективність використання безпроводного каналу.

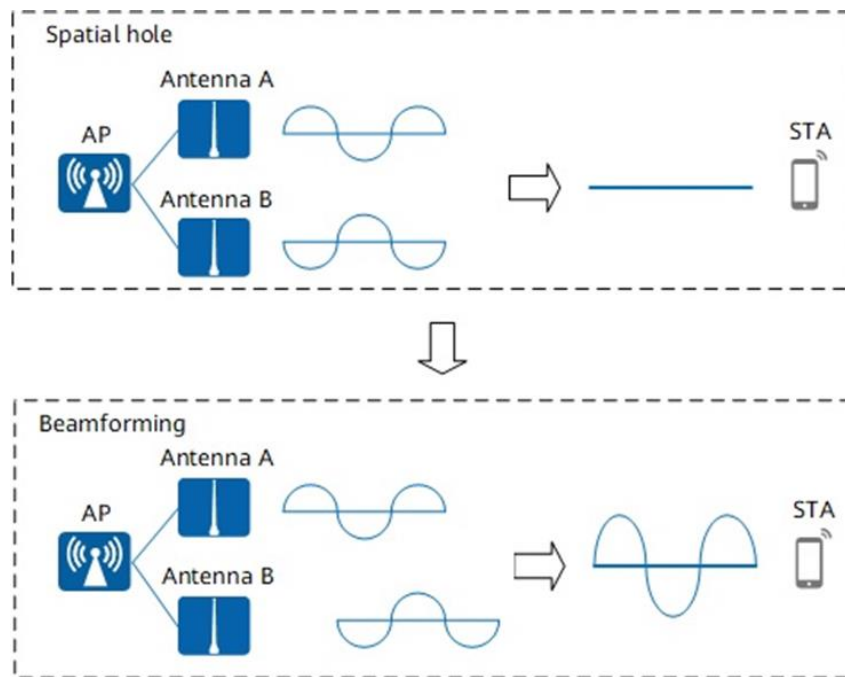


Рисунок 3.1 – До пояснення технології beamforming

Технологія адаптивного спрямованого формування променя дозволяє точно налаштовувати переданий сигнал у напрямку клієнта, що покращує якість каналу зв'язку між точкою доступу та клієнтським пристроєм.

Завдяки спрямованому випромінюванню сигнал фокусується на передбачуваному розташуванні бездротового пристрою (або групи пристроїв), замість того щоб розповсюджуватися рівномірно в усіх напрямках. Це сприяє підвищенню швидкості передачі даних і розширенню зони покриття. Такий підхід особливо важливий для ефективної роботи MU-MIMO, який має обмежену ефективність при взаємодії з пристроями, що швидко змінюють своє місцезнаходження.

Beamforming аналізує параметри каналу зв'язку (CSI – Channel State Information) та на їх основі коригує налаштування сигналу. В залежності від способу отримання CSI, технологія beamforming може працювати в явному або неявному режимі.

3.2 Ефективність алгоритму interleaving

У середовищі з багатопроменевим поширенням сигналу на приймальній антені відбувається накладання хвиль, які прибувають із різними затримками. У результаті формується сумарний сигнал, що містить кілька несучих (у випадку технології OFDM). У певних умовах символи, передані послідовно в часі, можуть впливати на сусідні несучі, що призводить до виникнення групових помилок. Це, своєю чергою, може знизити завадостійкість системи передачі, особливо в частотних діапазонах, де діють інтенсивні перешкоди, як ілюструє рисунок 3.2.

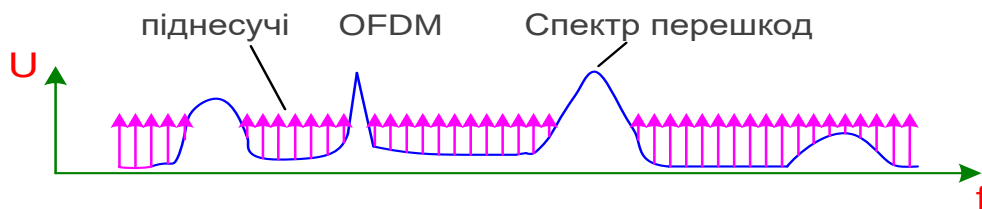


Рисунок 3.2 – Вплив селективної завади при передачі OFDM-сигналу

Ефект значних завмирань радіосигналу особливо помітний під час руху приймача відносно передавача. У таких випадках рівень сигналу на приймальній стороні може зазнавати глибоких завмирань, що досягають 40 дБ і більше. Проте ці завмирання не охоплюють увесь спектр частот, а впливають лише на певні вибіркові діапазони, що ілюструє рисунок 3.2.

У контексті технології OFDM це означає, що втрати даних відбуваються лише на окремих піднесійних частотах, що спричиняє часткову втрату бітів у переданому цифровому потоці. Відновлення таких втрат можливе завдяки застосуванню завадостійкого кодування та частотного перемежування (інтерплівінгу) піднесійних сигналів, що реалізується в рамках технології COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex).

У таких умовах виникають так звані групові помилки, які є особливо небезпечними, оскільки більшість стандартних методів захисту від завад

ефективно розпізнають і виправляють лише окремі помилки, але не групі. Це може призводити до значного погіршення якості зв'язку.

Для боротьби з груповими помилками у безпроводному зв'язку використовується метод Interleaving (перемежування). Його суть полягає в перестановці бітів перед передачею, щоб уникнути їхнього послідовного розташування. Наприклад, замість передавання бітів у порядку «1, 2, 3, 4, 5, 6...», вони перемішуються у послідовність «5, 3, 6, 1, 4, 2...». Ця схема перемежування зазвичай застосовується циклічно, наче маска, до всього цифрового потоку.

Після прийому сигналу біти повертаються у вихідний порядок. Якщо на певні біти (наприклад, 3, 6 і 1) вплине перешкода, після відновлення вони будуть розподілені по всьому потоку, що дозволяє застосувати стандартні алгоритми виправлення помилок. Цей принцип ілюструє рисунок 3.3.



Рисунок 3.3 – Приклад дії перемежування

Очевидно, що чим коротший відрізок сигналу піддається перемежуванню, тим коротші групові помилки він може ефективно компенсувати. Проте, якщо для перемежування використовується надто довгий відрізок сигналу, це збільшує вимоги до обчислювальних ресурсів, може призвести до додаткових затримок і підвищити навантаження на систему. Тому на практиці обирають компромісний варіант: достатньо тривалий кадр для перемежування, щоб

ефективно протистояти груповим помилкам, які часто виникають у радіоефірі, але без значних затримок.

Зазвичай застосовується багаторівневий підхід до інтерлівінгу. Спочатку виконується початкове перемежування, потім формується кадр, що містить кілька попередніх кадрів, після чого процедура повторюється. Така подвійна схема перестановки дозволяє значно підвищити надійність сигналу та практично повністю усунути довготривалі помилки у каналі зв'язку.

Крім того, Interleaving покращує стійкість до завад у каналі зв'язку. Це пов'язано з тим, що схеми перемежування можуть динамічно змінюватися, ускладнюючи аналіз сигналу сторонніми спостерігачами. Таким чином, процедура інтерлівінгу не тільки підвищує якість передачі, а й створює додаткові перешкоди для перехоплення корисного сигналу, що потребує значних часових і обчислювальних ресурсів для його розшифрування.

3.3 Висновки до розділу

Розглянуто ефективність двох важливих алгоритмів роботи безпроводних систем в умовах NLOS - beamforming та interleaving.

Показано, що в умовах NLOS сигнал може потрапляти до приймача через кілька відбитих шляхів, що може викликати багатопроменеві ефекти (інтерференція, дифракція). Beamforming дозволяє зменшити вплив таких відбитих сигналів, фокусуючи енергію на найбільш сприятливих шляхах. Крім цього, використання beamforming дозволяє мінімізувати вплив від інших відбитих сигналів або сторонніх джерел шуму, підвищуючи загальну якість зв'язку. У сучасних системах, таких як MIMO, beamforming може адаптуватися до змін у середовищі (наприклад, до руху приймача або зміни перешкод), що забезпечує більш стабільний зв'язок.

Перемежувач (інтерлевер) є основним елементом завадостійкого кодування, спрямованим на боротьбу з груповими помилками. Суть перемежування полягає в зміні порядку символів інформаційної послідовності

так, що сусідні символи виявляються розділеними кількома іншими. Це перетворює групові помилки в одиничні, що робить передачу інформації практично нечутливою до різноманітних завмирань, які виникають в умовах NLOS та LOS. Отже, частотне перемежування разом з виправляючими CRC-кодами виключає втрату даних при селективних завмираннях декількох несійних, що в технології OFDM призводить до злитих цифрових помилок.

4 ТЕХНОЛОГІЇ РОЗНЕСЕНОГО ПРИЙОМУ

Одним із головних спотворень, що вносить радіоканал, є завмирання сигналу, спричинене багатопроменевим поширенням, особливо в умовах міської забудови. Щоб мінімізувати їхній вплив на якість зв'язку, застосовують різні технології, зокрема рознесений прийом. Його принцип полягає в прийманні сигналу через кілька каналів, у кожному з яких реалізовано варіації переданого сигналу. Отримані сигнали потім об'єднуються з урахуванням їхньої ваги, що підвищує ймовірність якісного прийому хоча б в одному з каналів.

Рознесення сигналу може бути явним або неявним.

Явне рознесення передбачає надмірну передачу сигналу – той самий сигнал передається через кілька ресурсних елементів каналу, таких як тайм-слоти, частоти, коди тощо. На приймальному боці всі варіанти сигналу виявляються та об'єднуються.

Неявне рознесення базується на тому, що сигнал передається лише один раз, а його варіації виникають завдяки особливостям середовища поширення (наприклад, відбиття або заломлення). Використовуючи складні алгоритми обробки, можна покращити якість каналу зв'язку. Одним із прикладів неявного рознесення є RAKE-приймач, який ефективно використовує багатопроменеве поширення в міських умовах, компенсуючи різні затримки сигналів та підсумовуючи їх для покращення якості зв'язку.

Основні типи рознесеного прийому:

- Просторове рознесення
- Частотне рознесення
- Часове рознесення
- Багатопроменеве рознесення
- Поляризаційне рознесення

Об'єднання сигналів, отриманих з різних каналів, відбувається на векторній основі. Попереднє фазування (вирівнювання за фазою) забезпечує когерентне додавання сигналів, що дозволяє досягти максимального

співвідношення сигнал/шум як при оптимальному ваговому додаванні, так і при рівноважному додаванні.

4.1 Просторове рознесення

Просторове (антенне) рознесення передбачає обробку сигналів, отриманих щонайменше двома антенами, які розташовані на певній відстані одна від одної. Щоб мінімізувати кореляцію завмирань у різних каналах, ця відстань має становити не менше 10 довжин хвиль прийнятого сигналу. Завдяки цьому знижується ймовірність одночасного значного ослаблення сигналу на обох антенах.

Використання просторового рознесення покращує якість прийому, але водночас ускладнює конструкцію приймального обладнання. Прикладом реалізації цієї технології є стандарт бездротової телефонії DECT, де на базових станціях застосовуються дві просторово рознесені антени.

4.2 Частотне рознесення

Якщо використовується кілька несійних, (різних частот) для передачі одного і того ж сигналу то говорять про частотне рознесення. Відстань між частотами має бути настільки великою, щоб завмирання в різних каналах не корелювали між собою. Технологія вимагає ускладнення технічних засобів, однак основним недоліком, що обмежує використання цієї технології, є збільшене споживання спектральних ресурсів.

4.3 Часове рознесення

Часове рознесення – це коли для передачі одного й того ж сигналу використовують кілька рознесених у часі тайм-слотів. Рознесення часових слотів

повинно перевищувала тривалість завмирання сигналу, щоб завмирання в кожному інтервалі не були корельовані між собою.

Ця технологія знаходить найширше застосування для каналів з відносно швидкими завмираннями, коли тривалість завмирання невелика. Канали з повільними завмираннями вимагають значно більших часових інтервалів, що може призвести до значної затримки передачі і знизити загальну ефективність мережі доступу. Процес обробки символів, які повторюються, базується на їх додаванні відповідним чином.

4.4 Багатопроменеве рознесення

4.4.1 Загальна характеристика

Раніше технологію багатопроменевого рознесення розглядали як фактор, що призводить до спотворення сигналу. Але на сьогодні змінюється підхід до багатопроменевості. Насправді, будь-який сигнал відлуння є додатковим джерелом енергії, що спрямована до приймача, тому виникає перевага — енергія, яка в іншому випадку була б втрачена, тепер використовується. Сигнал має бути сформований так, щоб його окремі реалізації були розпізнані при прийомі. Тоді приймач буде володіти енергією, що надійшла через різні траєкторії, отже багатопроменевість може покращити характеристики системи доступу.

Багатопроменеве рознесення символів завдячує природним перешкодам, які сприяють існуванню різних траєкторій надходження сигналів у точку прийому. Широке застосування ця технологія має в системах з кодовим розділенням каналів (CDMA). Затримки, які вносяться різними траєкторіями, не повинні перевищувати тривалість чіпа послідовності, яка при цьому повинна бути "білою". Структура приймача: узгоджений фільтр, або корелятор, здатний розрізняти компоненти сигналу по різних променях. Кореляційна обробка з використанням розширюючої чіпової послідовності виділяє сигнали різних траєкторій, після чого вони піддаються оптимальному додаванню.

Ми розглядаємо найскладніший випадок, коли робота ведеться в умовах відсутності прямої видимості і на вході приймача формується складений сигнал - сума сигналів, отриманих різними шляхами. Але може бути по-різному залежно від конкретних умов. Наприклад, при міській забудові більша кількість каналів багатопроменевого поширення хвиль може бути корисною. Проте у стандартних умовах може бути достатнім для виконання більшості завдань менша кількість каналів.

Багатопроменеве поширення сигналів - це основне джерело завад у безпроводному зв'язку. Тому продовжують активно розвиватися різноманітні алгоритми обробки сигналів у таких умовах, що підтверджується великою кількістю публікацій з цієї теми [5–9]. Мета - подолання негативних ефектів багатопроменевого поширення. Реалізація - використання широкосмугових систем з складеними сигналами, що дають змогу активно боротися з наслідками цього явища і навіть для підвищення точності передачі інформації.

Загальна теорія інформації визначає складені сигнали, як такі, що характеризуються високою надмірністю. Прийом таких сигналів можна здійснювати цілісно або поелементно. Однак лише обробка складеного сигналу в цілому дає ефективне роздільне приймання променів при багатопроменевому поширенні і реалізує всі можливі переваги. Тому важливою задачею є розробка алгоритмів для оптимальної обробки складених сигналів у широкосмугових системах зв'язку. Це дозволяє обґрунтовано підходити не лише до дослідження самих сигналів, але і до методів їх приймання [9-14].

4.4.2 Багатопроменевий прийом складених сигналів

Розглянемо методи прийому складених сигналів у багатопроменевому каналі зв'язку. Один з підходів передбачає прийом окремих променів, інший - прийом елементів складеного сигналу.

Роздільний прийом сигналів, що надійшли через різні траєкторії в багатопроменевому каналі, дозволяє використання складених сигналів, що мають певну автокореляційну функцію. Очевидно, кожен вхідний промінь несе

частину інформації про переданий сигнал, тому використання всіх променів дає шанс на підвищення точності передачі. Для цього слід додати роздільно прийняті промені. Поділ променів необхідний саме для того, щоб їх можна було коректно додавати. Іноді промені додаються без попереднього розділення.

Додавання променів необхідно виконувати за певним алгоритмом. Він подібний до задачі додавання сигналів при рознесеному прийомі та прийомі сигналів з надмірністю. Завдання оптимального використання надмірності прийнятих сигналів вирішується методами прийому в цілому. Окремо прийняті промені розглядаються як частини одного сигналу. Виходячи з цього можна побудувати алгоритми для їх додавання.

Оптимальні алгоритми прийому складених сигналів (у загальному випадку) для багатопроменевого каналу можуть бути розроблені за допомогою критерію ідеального спостерігача. Алгоритми додавання променів у цьому контексті збігаються зазвичай з алгоритмами прийому в цілому. Через це методи додавання променів класифікуються відповідно до методів прийому в цілому. Отже, методи прийому складених сигналів у багатопроменовому каналі вимальовуються як комбінація підходів до прийому або окремих променів, або елементів складеного сигналу.

Розглянемо на прикладах когерентного прийому та некогерентного прийому з когерентним додаванням променів і їх елементів методи прийому складених сигналів.

Сигнал за умови когерентного прийому при передачі r -го варіанта ($r = 1, 2, \dots, m$) подається у вигляді:

$$x(t) = \sum_{i=1}^L \mu_i \sum_{k=1}^N a_{kr} \cos[\omega_{kr}(t - \Delta t_i) + \varphi_{kr} + \varphi_{ik}] + n(t) = \sum_{i=1}^L \mu_i \sum_{k=1}^N s_{kr}[(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] + n(t), \quad (4.1)$$

де $\sum_{k=1}^N a_{kr} \cos[\omega_{kr}t + \varphi_{kr}] = \sum_{k=1}^N s_{kr}(t) = s_r(t)$ – складений сигнал, що відповідає передачі r -го символу і складається з N взаємоортогональних елементів на інтервалі посилки T ; φ_{ik} – невизначена фаза k -го елемента сигналу

в i -му промені; L – число прийнятих променів; μ_i – коефіцієнт передачі i -го променя; Δt_i – затримка i -го променя відносно першого; $n(t)$ – флуктуаційна завада.

Було прийнято використання критерію ідеального спостерігача, отже приймач повинен при рівноімовірних символах прийняти рішення про передачу r -го символу, якщо при всіх $r \neq q$ ($q = 1, 2, \dots, m$):

$$\omega \left[\frac{x(t)}{s_r(t)} \right] > \omega \left[\frac{x(t)}{s_q(t)} \right], \quad (4.2)$$

де $\omega \left[\frac{x(t)}{s_r(t)} \right]$ – умовна щільність імовірності прийому сигналу $x(t)$ при передачі $s_r(t)$, яка дорівнює щільності імовірності реалізації завади $n(t)$, що подається таким чином:

$$n(t) = x(t) - \sum_{i=1}^L \mu_i \sum_{k=1}^N s_{kr}[(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}]. \quad (4.3)$$

Щільність імовірності заданої реалізації завади на інтервалі (0-T) має вигляд:

$$\omega[n(t)] = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi v_0^2 \Delta F} \right)^B} \exp \left[-\frac{1}{v_0^2} \int_0^T n^2(t) dt \right], \quad (4.4)$$

де v_0^2 – спектральна щільність завади; $B = 2\Delta F T$ – розмірність простору завади (подвоєний добуток тривалості реалізації на смугу пропускання каналу).

Підставимо (4.3) в (4.4) і отримаємо:

$$\omega \left[\frac{x(t)}{s_r(t)} \right] = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi v_0^2 \Delta F} \right)^B} \exp \left[-\frac{1}{v_0^2} P_{\text{np}} T - \frac{1}{v_0^2} \int_0^T \mu_i^2 P_r T dt \right] \times$$

$$\times \exp \left\{ \frac{2}{v_0^2} \sum_{i=1}^L \mu_i \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} x(t) \sum_{k=1}^N s_{kr} [(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] dt \right\} \times \\ \exp \left\{ \frac{1}{v_0^2} \sum_{i,j}^L \mu_i \mu_j \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} \sum_{k=1}^N s_{kr} [(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] \sum_{k=1}^N s_{kr} [(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] dt \right\}, \quad (4.5)$$

де $P_{\text{пр}} = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$ – потужність сигналу на приймальному боці; $P_r = \frac{1}{T} \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} \left\{ \sum_{k=1}^N s_{kr} [(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] \right\}^2 dt$ – потужність r -го варіанта сигналу.

Після виконання низки перетворень (4.1)...(4.5) можна отримати оптимальне правило рішення про прийом r -го символу для систем з активною паузою ($P_r = P_q$) за умови повністю відомого сигналу. Це правило представляється нерівністю такого виду:

$$\sum_{i=1}^L \mu_i \sum_{k=1}^N \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} x(t) s_{kr} [(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] dt > \sum_{i=1}^L \mu_i \sum_{k=1}^N \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i+T} x(t) s_{kq} [(t - \Delta t_i) - \varphi_{ik}] dt \quad (4.6)$$

Вираз (4.6) – це алгоритм когерентного додавання променів при когерентному прийомі елементів сигналу. На рисунку 4.1 наведена структурна схема приймача, що реалізує цей алгоритм (4.6).

Згідно з алгоритмом (4.6) кожен промінь приймається когерентно, а після їх прийому всі промені додаються з ваговими коефіцієнтами - з урахуванням коефіцієнта передачі променя μ_i .

Приймач складається з L когерентних приймачів для окремих променів. На входи приймачів подаються сигнали, причому враховуються коефіцієнти передачі кожного конкретного променя.

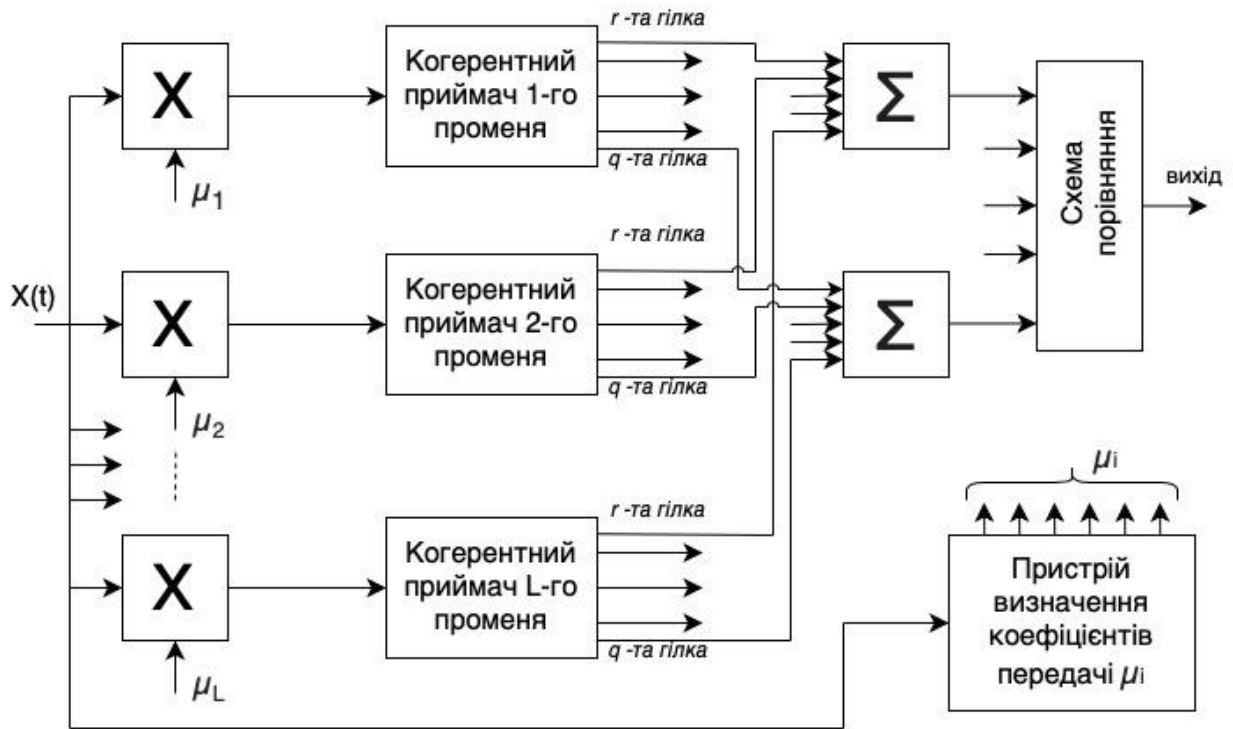


Рисунок 4.1 – Структурна схема приймача когерентного прийому у багатопроменовому каналі

Сигнали з виходів приймачів додаються й передаються на порівняльну схему, якщо вони відповідають однаковим варіантам сигналів різних променів. Кожен приймач оснащений пристроєм для визначення коефіцієнта передачі прийнятого променя.

Алгоритм (4.6) можна подати також в іншому вигляді. Для цього слід вибрати межі інтегрування так, щоб час аналізу сигналу (від 0 до T) був спільним для всіх променів. Крім цього необхідно забезпечити, щоб сусідні посилки сигналу не перекривалися. Отримаємо:

$$\sum_{k=1}^N \int_0^T \sum_{i=1}^L \mu_i x[(t + \Delta t_i) + \varphi_{ik}] s_{kr}(t) dt > \sum_{k=1}^N \int_0^T \sum_{i=1}^L \mu_i x[(t + \Delta t_i) + \varphi_{ik}] s_{kq}(t) dt \quad (4.7)$$

де Δt_i – затримка i -го променя по відношенню до останнього прийнятого.

Тут аналізується сумарний сигнал, складові якого відповідним чином затримані та сфазовані з урахуванням розташування прийнятих променів. Через це алгоритм (4.7) відрізняється від стандартного алгоритму когерентного прийому складених сигналів. На рис. 4.2 представлена структурна схема приймача, що реалізує алгоритм (4.7) у випадку, коли фаза сигналу в кожному промені однакова для всіх елементів, тобто $\varphi_{ik} = \varphi_i$.

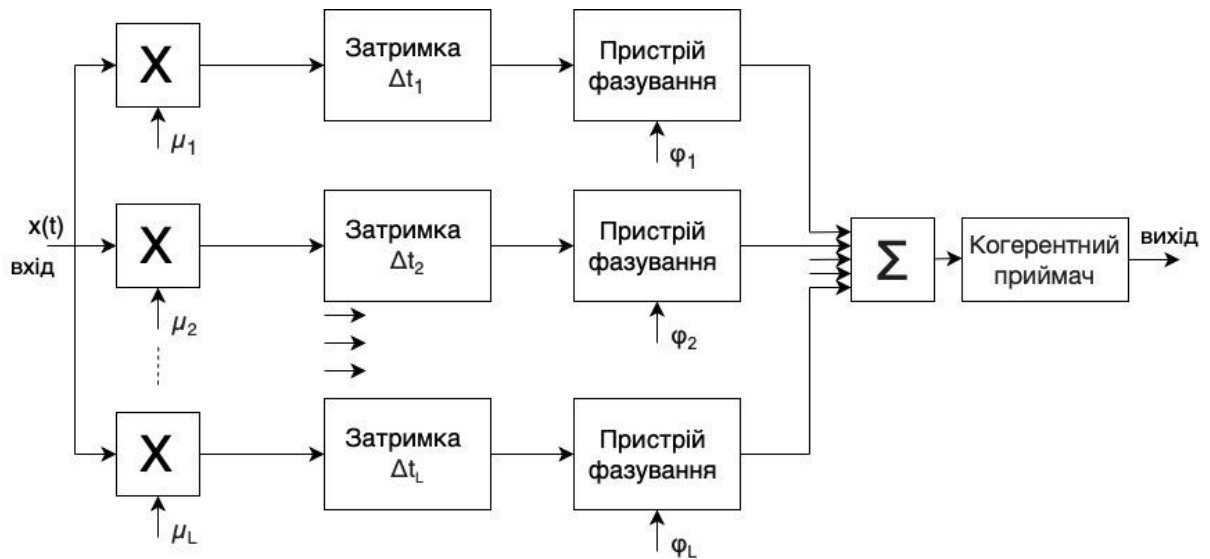


Рисунок 4.2 – Структурна схема когерентного приймача при додаванні променів на його вході

Приймач налаштований на певну кількість прийнятих променів. Це визначає його L гілок для підстроювання та фазування сигналу. У кожній гілці відбувається урахування вагового коефіцієнта - сигнал множиться на коефіцієнт передачі променя μ_i і затримується на час Δt_i , що визначає затримку цього променя відносно останнього. Також здійснюється корекція фази. Ця процедура потрібна, щоб усі вихідні сигнали гілок мали однакову невизначену фазу.

На виході гілок сигнали додаються і ця сума передається на когерентний приймач складених сигналів. Зауважимо, що приймач оснащений пристроями для визначення вагових коефіцієнтів (коефіцієнтів передачі променів μ_i), невизначених фаз φ_i та затримок Δt_i .

У місці прийому можуть бути відомі коефіцієнти передачі променів μ_i . Визначимо алгоритм некогерентного оптимального прийому для таких умов. Для елементів сигналу невизначені фази у всіх променях φ_{ik} однакові, але невідомі, тобто $\varphi_{ik} = \varphi_i$. Якщо ж фази різні, то вони коригуються, створюючи фазування всіх променів (і, якщо необхідно, елементів). Умовна щільність ймовірності прийому сигналу $x(t)$ при передачі $s_r(t)$ має вигляд:

$$\omega \left[\frac{x(t)}{s_r(t)} \right] = A \cdot \exp \left[-\frac{1}{v_0^2} P_{\text{пр}} T - \frac{1}{v_0^2} \sum_{i=1}^L \mu_i^2 P_r T \right] \times \\ \exp \left\{ \frac{2}{v_0^2} \sum_{i=1}^L \mu_i \sum_{k=1}^N \left[\cos \varphi_{ik} \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i + T} x(t) s_{kr}(t - \Delta t) dt + \sin \varphi_{ik} \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i + T} x(t) s_{kr}^*(t - \Delta t) dt \right] \right\}, \quad (4.8)$$

де $s_{kr}^*(t - \Delta t)$ – функція, сполучена по Гільберту з $s_{kr}(t - \Delta t)$; $A = \frac{1}{\left(\sqrt{2\pi v_0^2 \Delta F} \right)^B}$;

$P_{\text{пр}} = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt$ – потужність прийнятого сигналу;

$P_{\text{пр}} = \frac{1}{T} \int_{\Delta t_i}^{\Delta t_i + T} \left\{ \sum_{k=1}^N s_{kr}[(t - \Delta t) - \varphi_{ik}] \right\}^2 dt$ – потужність r -го варіанту сигналу.

Вважаючи, що всі значення рівноімовірні, для знаходження оптимального алгоритму прийому виконаємо усереднення (4.8) по всіх можливих значеннях фази φ в інтервалі $0-2\pi$:

$$\omega \left[\frac{x(t)}{s_r(t)} \right] = \int_0^{2\pi} \omega \left[\frac{x(t)}{s_r(t)}, \varphi \right] \omega(\varphi) d\varphi = \\ \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \omega \left[\frac{x(t)}{s_r(t)}, \varphi \right] \omega(\varphi) d\varphi. \quad (4.9)$$

Отримаємо після усереднення:

$$\omega \left[\frac{x(t)}{s_r(t)} \right] = A \exp \left[-\frac{1}{v_0^2} P_{\text{пр}} T - \frac{1}{v_0^2} \sum_{i=1}^L \mu_i^2 P_r T \right] \times I_0 \left[\frac{2\mu_i}{v_0^2} V_r \right], \quad (4.10)$$

де I_0 – модифікована функція Беселя нульового порядку.

Правило рішення про прийом r -го символу для систем з активною паузою запишемо:

$$\ln I_0 \left[\frac{2\mu_i}{v_0^2} V_r \right] > \ln I_0 \left[\frac{2\mu_i}{v_0^2} V_q \right]. \quad (4.11)$$

Якщо сигнали різних променів прийняти за вектори, то величини V_r і V_q є геометричною сумою таких векторів, що додаються когерентно, оскільки мають однакову фазу [10].

Правило (4.11) можна спростити, виходячи з того, що $\ln I_0(x)$ при $x > 0$ є монотонною функцією. Тоді отримаємо:

$$V_r > V_q. \quad (4.12)$$

По відношенню до променів для алгоритму (4.12) виконуються ті ж операції, що і для елементів при некогерентному прийомі з когерентним накопиченням. Це означає, що оптимальним методом прийому, коли фази сигналів всіх променів невідомі, але рівні, є некогерентний прийом з когерентним додаванням променів і елементів.

Величина V_r може бути подана у вигляді:

$$V_r = \sqrt{\left[\sum_{k=1}^N \int_0^T \sum_{i=1}^L \mu_i x[(t - \Delta t_i)] s_{kr}(t) dt \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^N \int_0^T \sum_{i=1}^L \mu_i x[(t - \Delta t_i)] s_{kr}^*(t) dt \right]^2} \quad (4.13)$$

Структурна схема приймача, який реалізує алгоритм (4.12) для обчислення за формулою (4.13), схожа зі схемою, рис. 4.2. Відмінність у тому, що має місце заміна когерентного приймача на некогерентний. Приймач може бути реалізований за допомогою будь-якого з розглянутих методів. Якщо ж сигнали вхідних променів мають однакову фазу, то пристрої фазування променів не використовуються.

На рис. 4.3 зображена структурна схема гілки приймача для обчислення величини V_r відповідно до (4.13). Приймач у загальному вигляді повинен включати пристрої для визначення затримок Δt_i , коефіцієнтів передачі μ_i , а також генератор сигналів $(t - \Delta t_i)$.

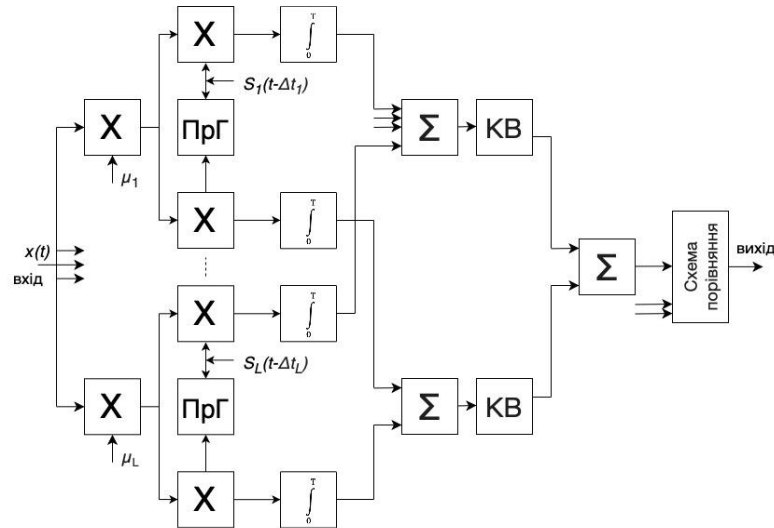


Рисунок 4.3 – Структурна схема некогерентного приймача з когерентним додаванням променів і елементів сигналу

Далі розглянемо вирази для ймовірностей помилки при когерентному та оптимальному некогерентному методах прийому для деяких видів складених сигналів у двійкових системах, адаптуючи відомі вирази для поелементного прийому [4, 8].

Когерентний метод прийому в цілому. Вираз для ймовірності помилки в цьому випадку:

$$\rho_{\text{км}} = F(\gamma\sqrt{Nh_k}), \quad (4.14)$$

де $F(x) = \frac{1}{2\pi} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$; γ – коефіцієнт, що дорівнює $\sqrt{2}$ для систем з протилежними сигналами; 1 – для систем з ортогональними сигналами з активною паузою; $1/\sqrt{2}$ – для систем з пасивною паузою.

Для систем з однократною ФРМ імовірність має вигляд:

$$\rho_{\text{фрм}} = 2F(\sqrt{2}\sqrt{Nh_k}). \quad (4.15)$$

Некогерентний прийом з когерентним накопиченням. При прийомі ортогональних сигналів з активною паузою [9] імовірність помилки дорівнює:

$$\rho_{\text{опт}} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{Nh_k^2}{2}\right), \quad (4.16)$$

при прийомі сигналів з однократною ФРМ:

$$\rho_{\text{фрм}} = \frac{1}{2} \exp(-Nh_k^2). \quad (4.17)$$

Вирази імовірності помилки для двох видів прийому у багатопозиційних системах з числом варіантів сигналу m мають дещо інший вигляд. При прийомі ортогональних сигналів з активною паузою, якщо має місце когерентний прийом в цілому, залежність наступна:

$$\rho_{\text{опт}} \approx \sqrt{m-1} \exp\left(-\frac{Nh_k^2}{2} - 1,4\right). \quad (4.18)$$

Може бути прийом складених сигналів з багатократною ФРМ. Тоді інший вигляд залежності:

$$\rho_{\text{фрм}} \approx 2F\left(\sqrt{2}\sqrt{Nh_k} \sin\left|\frac{\pi}{2^n}\right|\right), \quad (4.19)$$

де n – кратність системи; $m = 2^n$.

При некогерентному прийомі ортогональних сигналів з активною паузою з когерентним накопиченням [10]:

$$\rho_{\text{опт}} = \sum_{n=1}^{m-1} (-1)^{n+1} C_{m-1}^n \frac{1}{n+1} \exp\left(-\frac{n}{n+1} Nh_k^2\right), \quad (4.20)$$

$$\text{де } C_{m-1}^n = \frac{(m-1)!}{n!(m-1-n)!}.$$

Отже, відповідно до виразів (4.15)...(4.20) імовірність помилки при когерентному та некогерентному з когерентним накопиченням методах прийому при рівній енергії складених сигналів не залежить від бази і ширини спектру сигналу.

4.5 Висновки до розділу

Для підвищення надійності роботи безпроводних систем в умовах багатопроменевого поширення сигналів використовуються різноманітні технології рознесеного прийому. До таких технологій відносять: частотне, часове, просторове та багатопроменеве рознесення. Багатопроменеве рознесення проаналізовано найбільш детально.

За умови відомих фаз сигналів всіх променів при прийомі складених сигналів у багатопроменовому каналі доцільно застосовувати когерентний метод прийому, при якому кожен промінь приймається когерентно, а потім промені додаються за ваговим принципом - з урахуванням коефіцієнтів їх передачі. Некогерентний метод прийому з когерентним додаванням променів та елементів використовується, якщо фази сигналів невідомі, але однакові для всіх променів. Показник V_r є геометричною сумою векторів, що відповідають сигналам різних променів, які складаються когерентно. Визначено ймовірності помилки та завадостійкість для різних методів прийому складених сигналів за наявності флуктуаційних завад. Завадостійкість як когерентного методу прийому в цілому, так і некогерентного прийому з когерентним накопиченням не залежить від бази сигналу.

5 ЗАВАДОСТІЙКІСТЬ СИСТЕМИ (МОДЕЛЮВАННЯ)

5.1. Завадостійкість системи зв'язку за відсутності багатопроменевих спотворень

Було проведено експерименти для аналізу завадостійкості системи зв'язку за умов відсутності багатопроменевих спотворень, залежно від відношення енергії сигналу до односторонньої спектральної щільності білого шуму. Отримані результати представлено в таблиці 6.1.

Таблиця 5.1 - Ймовірність помилки системи зв'язку за відсутності багатопроменевих спотворень

E/N	-10	0	10	20	30	40
P	0,448957	0,193798	0,00139379	0	0	0

Для наочного представлення результатів було побудовано графік, зображений на рис. 5.1.

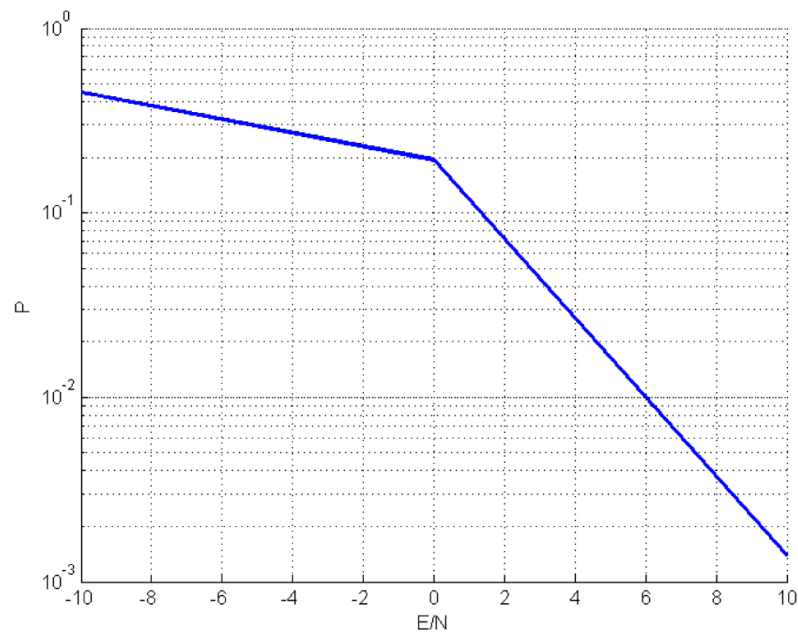


Рисунок 5.1 - Ймовірність помилки системи зв'язку за відсутності багатопроменевих спотворень.

Як показують результати експериментів, зі збільшенням відношення E/N ймовірність помилки під час передавання інформації

зменшується. Варто зазначити, що при значенні E/N понад 20 дБ на 10 000 000 біт не спостерігається жодної помилки [13].

5.2 Завадостійкість системи зв'язку при передачі сигналів через релеївські канали

Були проведені дослідження завадостійкості системи зв'язку під час передавання сигналів через релеївські канали. Ймовірність помилки змінювалася залежно від частоти замирань та відношення сигналу до шуму. У процесі моделювання змінювали вихідні параметри - розмір алфавіту модуляції M та ширину частотного інтервалу з мінімальною енергією сигналу df .

Таблиця 5.2 - Ймовірність помилки системи зв'язку при передаванні сигналів через релеївські канали з $M=2$ та $df=2E+6$.

E/N Profile length	-10	0	10	20	30	40
256	0.499517	0.499593	0.500358	0.499274	0.499938	0.499523
512	0.479906	0.385989	0.286586	0.263432	0.265199	0.260524
1024	0.476008	0.381734	0.283776	0.247686	0.246207	0.245489
2048	0.475816	0.35115	0.240807	0.212674	0.206595	0.219442

Таблиця 5.3 - Ймовірність помилки системи зв'язку при передаванні сигналів через релеївські канали з $M=2$ та $df=4E+6$.

E/N Profile length	-10	0	10	20	30	40
256	0.499803	0.499305	0.500617	0.500239	0.500874	0.500024
512	0.48083	0.384277	0.285906	0.264222	0.259536	0.262947
1024	0.477496	0.385215	0.274574	0.24244	0.242595	0.245497
2048	0.472623	0.359624	0.240372	0.208289	0.210658	0.213777

Таблиця 5.4 - Ймовірність помилки системи зв'язку при передаванні сигналів через релеївські канали з $M=2$ та $df=8E+6$.

E/N Profile length	-10	0	10	20	30	40
256	0.500459	0.500248	0.50009	0.499894	0.500124	0.500974
512	0.481594	0.382576	0.27760	0.267553	0.264356	0.256295
1024	0.477485	0.380527	0.282942	0.245832	0.245922	0.238636
2048	0.473964	0.355261	0.234385	0.21597	0.210279	0.22075

Таблиця 5.5 - Ймовірність помилки системи зв'язку при передаванні сигналів через релеївські канали з $M=4$ та $df=2E+6$.

E/N Profile length	-10	0	10	20	30	40
256	0.499077	0.500115	0.499707	0.499834	0.50106	0.499998
512	0.493403	0.454754	0.427105	0.409079	0.416528	0.408802
1024	0.488975	0.449967	0.403076	0.38358	0.382824	0.381205
2048	0.491831	0.436056	0.355532	0.338555	0.340209	0.330175

Таблиця 5.6 - Ймовірність помилки системи зв'язку при передаванні сигналів через релеївські канали з $M=4$ та $df=4E+6$.

E/N Profile length	-10	0	10	20	30	40
256	0.500105	0.501116	0.500074	0.499584	0.50044	0.501872
512	0.490029	0.454962	0.420506	0.411155	0.402806	0.404174
1024	0.489657	0.453335	0.406024	0.379834	0.37819	0.374133
2048	0.489365	0.432165	0.359953	0.336579	0.334016	0.32844

Таблиця 5.7 - Ймовірність помилки системи зв'язку при передаванні сигналів через релеївські канали з $M=4$ та $df=8E+6$.

E/N Profile length	-10	0	10	20	30	40
256	0.499954	0.500203	0.500178	0.500522	0.499862	0.500924
512	0.493354	0.45667	0.419584	0.406558	0.406134	0.413014
1024	0.490657	0.451355	0.395404	0.376819	0.374754	0.375814
2048	0.490936	0.437092	0.367365	0.339225	0.342367	0.338766

Для наочного представлення результатів побудовано графіки ймовірності помилки системи зв'язку під час передавання сигналів через релеївські канали (рис. 5.2–5.7).

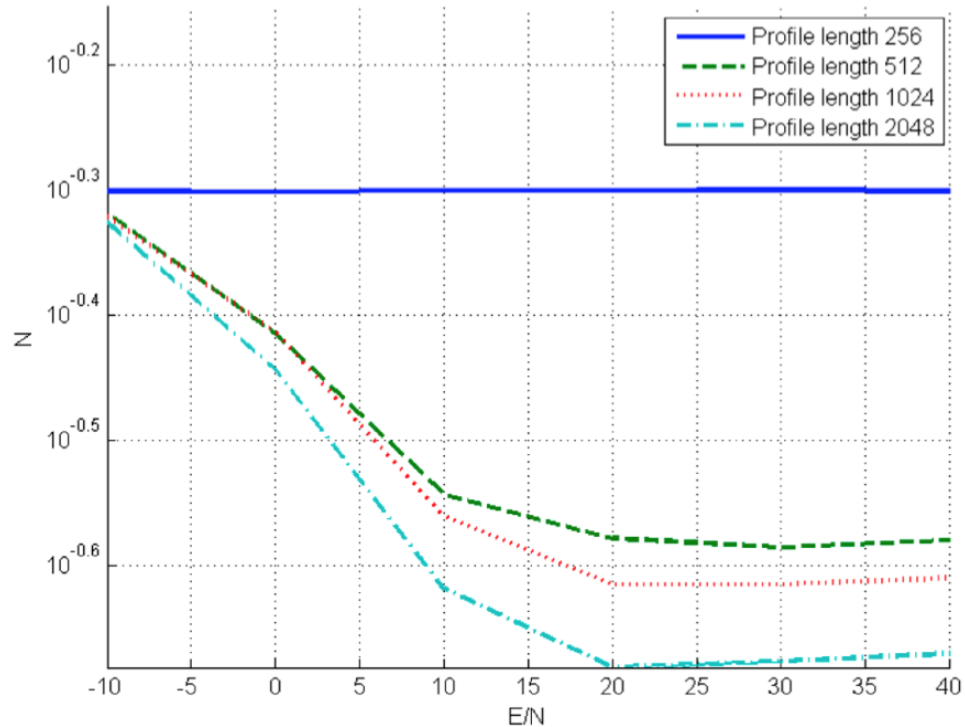


Рисунок 5.2 - Ймовірність помилки системи зв'язку при передаванні сигналів через релеївські канали з $M=2$ та $df=2E+6$

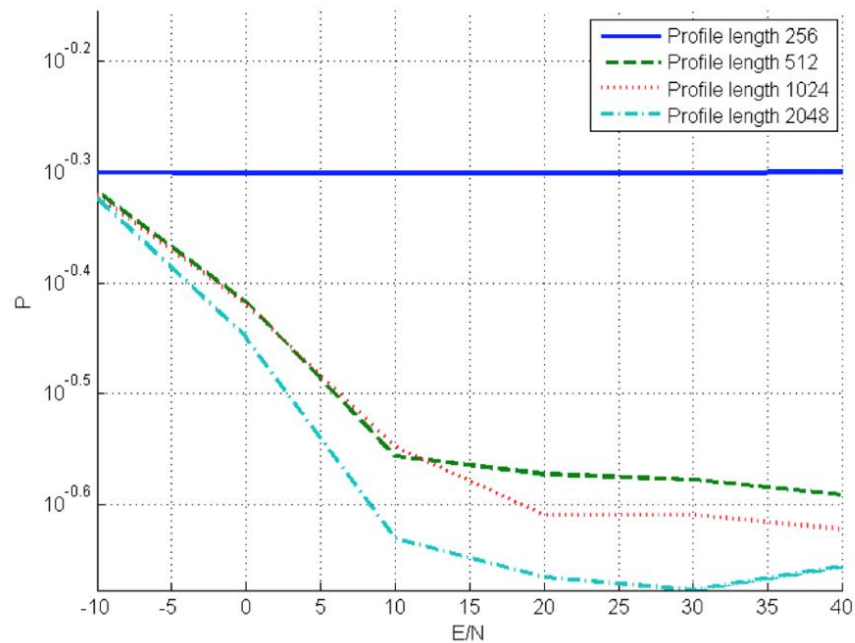


Рисунок 5.3 - Ймовірність помилки системи зв'язку при передаванні сигналів через релеївські канали з $M=2$ та $df=4E+6$

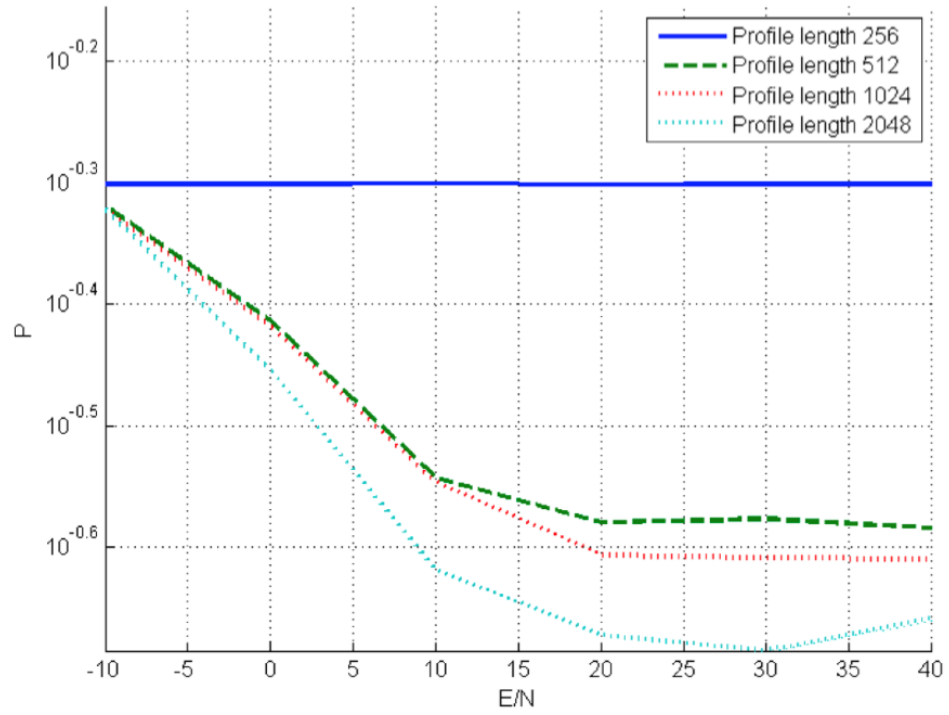


Рисунок 5.4 - Ймовірність помилки системи зв'язку при передаванні сигналів через релєйські канали з $M=2$ та $df=8E+6$

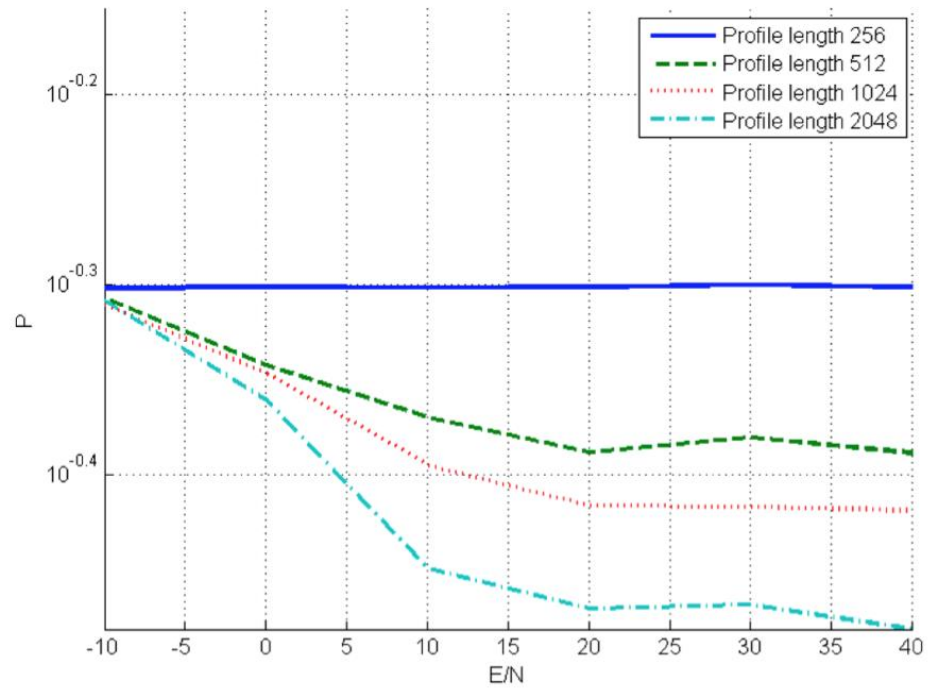


Рисунок 5.5 - Ймовірність помилки системи зв'язку при передаванні сигналів через релєйські канали з $M=4$ та $df=2E+6$

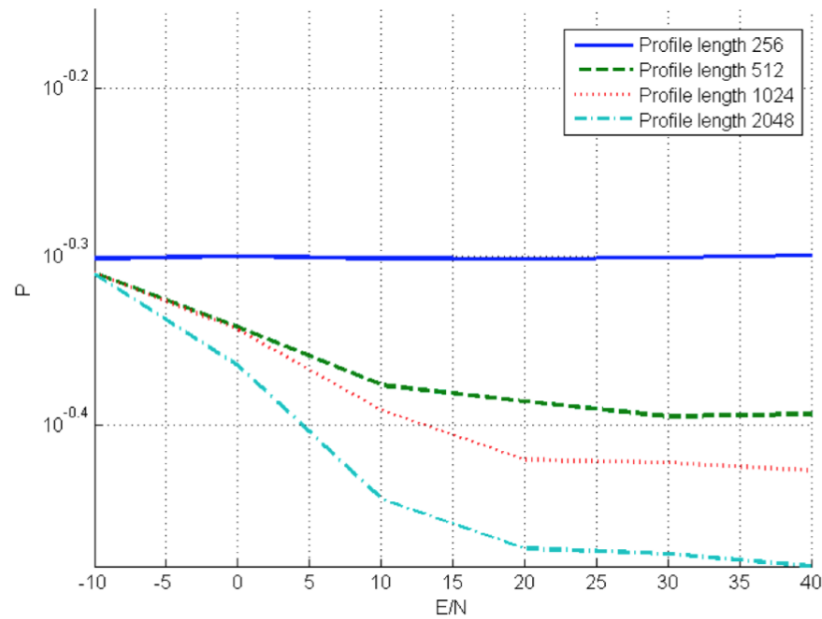


Рисунок 5.6 - Ймовірність помилки системи зв'язку при передаванні сигналів через релеївські канали з $M=4$ та $df=4E+6$

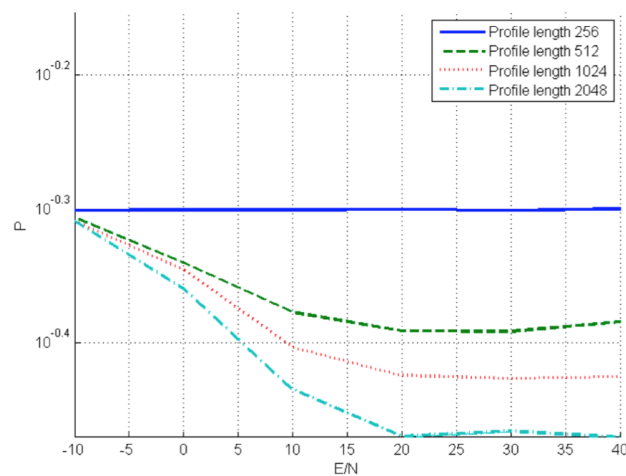


Рисунок 5.7 - Ймовірність помилки системи зв'язку при передаванні сигналів через релеївські канали з $M=4$ та $df=8E+6$

Як показують результати експериментів, відношення енергії сигналу до односторонньої спектральної щільності білого шуму має менший вплив на ймовірність помилки, ніж тривалість багатопроменевих завмирань. Варто зазначити, що збільшення тривалості завмирань (цей параметр безпосередньо впливає на частоту завмирань) призводить до зменшення ймовірності помилки [19].

5.3 Висновки до розділу

В даному розділі було проведено експериментальне дослідження впливу багатопробенеких спотворень інформаційних сигналів на ймовірність помилки декодування прийнятих сигналів.

Аналіз отриманих експериментальних результатів дозволяє зробити такі висновки:

- Відношення енергії сигналу до односторонньої спектральної щільності білого шуму має менший вплив на ймовірність помилки, ніж тривалість багатопробенеких завмирань.
- Збільшення тривалості завмирань (цей параметр безпосередньо визначає частоту завмирань) сприяє зменшенню ймовірності помилки.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

У сучасному світі бездротові технології відіграють ключову роль у різних галузях – від телекомунікацій до автоматизованих систем управління. Однак робота в умовах NLOS, де сигнал стикається з перешкодами, такими як будівлі чи природні об'єкти, створює не лише технічні виклики, а й потребує суворого дотримання принципів охорони праці.

Дослідження таких систем часто пов'язане з використанням складного обладнання, проведенням експериментів у нестандартних умовах та роботою з електромагнітними полями. Це вимагає від дослідників не лише високої кваліфікації, але й чіткого розуміння ризиків, пов'язаних із безпекою. У цій доповіді ми розглянемо, як забезпечити безпечні умови праці під час розробки та тестування алгоритмів для NLOS, а також обговоримо ключові аспекти організації робочого процесу, щоб мінімізувати потенційні загрози для здоров'я та життя дослідників.

Дослідження спеціальних алгоритмів роботи безпроводних систем при відсутності прямої видимості NLOS відбувалося в приміщенні, яке обладнане робочими місцями з ПК. На дослідника 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; недостатня освітленість робочої зони; відсутність чи нестача природного освітлення.

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

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Конструкція робочого місця та розташування його елементів повинні відповідати антропометричним, фізіологічним і психологічним потребам людини. Сучасні офісні крісла часто оснащені механізмами для вільного переміщення по приміщенню завдяки коліщаткам і поворотним елементам. Крім того, вони мають регульовані спинки, що допомагають зменшити навантаження на спину та шию. Вибираючи крісло, варто звернути увагу на такі характеристики: можливість регулювання висоти сидіння, спинки з налаштуванням по висоті та куту нахилу, достатня глибина сидіння, стійкість конструкції та відповідність коліщаток типу підлогового покриття. Конструкція робочого місця та розташування його елементів повинні відповідати антропометричним, фізіологічним і психологічним потребам людини. Сучасні офісні крісла часто оснащені механізмами для вільного переміщення по приміщенню завдяки коліщаткам і поворотним елементам. Крім того, вони мають регульовані спинки, що допомагають зменшити навантаження на спину та шию. Вибираючи крісло, варто звернути увагу на такі характеристики: можливість регулювання висоти сидіння, спинки з налаштуванням по висоті та куту нахилу, достатня глибина сидіння, стійкість конструкції та відповідність коліщаток типу підлогового покриття.

При регулюванні стільця необхідно враховувати як розміри тіла, так і висоту робочої поверхні столу, якщо вона не регулюється. Висоту сидіння треба відрегулювати так, щоб можна було зручно розташуватися на ньому; при цьому ступні ніг повинні опиратися на підлогу, а зазор між передньою частиною стільця і ногами дослідника повинен складати 5 сантиметрів. Після цього слід відрегулювати спинку як у вертикальному, так і в поперечному напрямках, щоб не напружувався поперек.

Щодня перед початком роботи працівник повинен:

- оглянути своє робоче місце; про виявлення ознак пошкодження обладнання інформувати свого безпосереднього керівника;

- відрегулювати освітленість на робочому місці, переконатися в відсутності відблисків на екрані комп'ютера, відсутності зустрічного світла;
- перевірити правильність підключення обладнання ПК до електромережі;
- очистити екран комп'ютера від пилу та інших забруднень;
- перевірити правильність організації робочого місця й за необхідності провести відповідні коригування.

Працівник під час роботи зобов'язаний:

- виконувати тільки ту роботу, яку йому було доручено;
- підтримувати порядок і чистоту на робочому місці;
- тримати відкритими всі вентиляційні отвори обладнання;
- коректно закрити всі активні завдання у разі припинення роботи з комп'ютером;
- негайно відключити комп'ютером від електричної мережі у разі виникнення аварійної ситуації.

У ході виконання робіт працівник повинен:

- витримувати відстань від очей до екрана комп'ютером в межах 60 - 70см;
- дотримуватися внутрішньозмінного режиму праці та відпочинку, регламентованих перерв у роботі;

Під час регламентованих перерв рекомендується виконувати комплекси вправ для очей, рук, хребта, поліпшення мозкового кровообігу тощо. Про виявлення несправності обладнання або інших факторів, які створюють загрозу для життя або здоров'я працівників, необхідно негайно інформувати свого безпосереднього керівника.

Не допускається:

- виконання ремонту та налагодження комп'ютерної техніки безпосередньо на робочому місці оператора;

- зберігання біля комп'ютера паперу, дискет, інших носіїв інформації, запасних блоків, деталей тощо, якщо вони не використовуються для поточної роботи;
- відключення захисних пристроїв, самочинні зміни в конструкції комп'ютера;
- використання комп'ютерів, на екранах яких під час роботи з'являються нехарактерні сигнали, нестабільне зображення на екрані тощо;
- доторкання до задньої панелі системного блоку при включеному живленні;
- вимикання живлення під час виконання активного завдання;
- попадання вологи на поверхню системного блоку, монітора, клавіатури, дисководів, принтерів та інших пристроїв;
- приймання напоїв та їжі на робочому місці.

Після закінчення роботи з використанням необхідно дотримуватися такої послідовності вимикання обладнання:

- закрити всі активні завдання;
- використавши опцію «Завершення роботи» у меню «Пуск», вимкнути живлення системного блоку;
- вимкнути живлення всіх комп'ютерів;
- вимкнути блок аварійного живлення (за наявності);
- відключити комп'ютер від електромережі, при цьому забороняється тягнути штепсельну вилку за дріт.

Приміщення, де здійснювалося дослідження спеціальних алгоритмів роботи безпроводних систем при відсутності прямої видимості NLOS використовується чотири провідна трифазна електромережа з заземленим нульовим проводом. Величина напруги цієї мережі становить 380 х 220В (фазна напруга (фаза – «0») – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Категорія умов з небезпеки електротравматизму – без підвищеної небезпеки, оскільки чинники підвищеної небезпеки (підвищена температура повітря (більша за 35°C), вологість (більша 75%), струмопровідна підлога,

струмопровідний пил, можливість одночасного дотику обслуговуючого персоналу до металевого корпусу споживача електроенергії та металоконструкцій, що мають зв'язок із землею) та особливої небезпеки (вологість повітря в приміщеннях близька до насичення, конденсація вологи на поверхні устаткування та будівельних конструкціях (100%); хімічно активне середовище, що призводить до руйнування ізоляції, чи біологічне середовище, що у вигляді плісняви утворюється на обладнанні та струмовідних елементах) відсутні.

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

Життєдіяльність людини завжди протікає у певних метеорологічних умовах, що визначаються поєднанням температури повітря, швидкості його руху і відносної вологості, барометричним тиском та інтенсивністю теплового випромінювання. Ці показники в сукупності (за винятком барометричного тиску) характеризують метеорологічні умови середовища (мікроклімат) виробничого приміщення. Якщо робота виконується на відкритих майданчиках, то метеорологічні умови визначаються кліматичним поясом і сезоном року. Проте і в цьому випадку в робочій зоні створюється певний мікроклімат.

Параметри мікроклімату закритих приміщень нормують санітарні норми ДСН 3.3.6.042-99 [22]. Робота з дослідження спеціальних алгоритмів роботи безпровідних систем при відсутності прямої видимості NLOS за енерговитратами відноситься до категорії I а (енерговитрати до 139Дж/с) [3]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.5.2.1.

Таблиця 6.1– 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 вказаних параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено використання централізованої парової системи опалення, системи механічної вентиляції, систематичного провітрювання та вологого прибирання (раз за зміну).

6.2.2 Склад повітря робочої зони

Повітря робочої зони залежно від хімічного складу, фізичних властивостей, наявності забруднюючих чинників може бути сприятливим, несприятливим або навіть небезпечним. Сприятливим повітряне середовище в робочій зоні буває тоді, коли воно має відповідну чистоту, нормальні хімічні показники та нормальний мікроклімат.

В приміщенні, де здійснюється дослідження спеціальних алгоритмів роботи безпроводних систем при відсутності прямої видимості NLOS у повітрі можуть бути наявні підвищені концентрації пилу та озону. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – 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	1
Вуглекислий газ	3	1	4

Для забезпечення у виробничих приміщеннях оптимальних параметрів мікроклімату та належної чистоти повітря (граничнодопустимих концентрацій шкідливих речовин) використовують вентилювання приміщень, яке здійснюють за допомогою сукупності пристроїв для транспортування, подання та видалення повітря.

6.2.3 Виробниче освітлення

Недостатність освітлення призводить до напруги зору, послаблює увагу, призводить до подальшої передчасної стомлюваності. Надмірно яскраве освітлення викликає осліплення, роздратування і різь в очах. Неправильний напрям світла на робочому місці може створювати різкі тіні, відблиски, дезорієнтувати працюючого. Всі ці причини можуть призвести до професійних захворювань, тому надзвичайно важливе значення має забезпечення оптимальної освітленості на робочому місці.

Згідно ДБН В.2.5-28-2018 [24] в приміщеннях, де здійснюється дослідження спеціальних алгоритмів роботи безпроводних систем при відсутності прямої видимості NLOS на ПК необхідно застосувати систему комбінованого освітлення.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 6.3:

Таблиця 6.3 - Норми освітленості в приміщенні

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

Для нормалізації освітленості в приміщенні слід передбачити обмеження прямої блискоті від джерел природного та штучного освітлення. При цьому яскравість світлих поверхонь (вікна, джерела штучного освітлення), що розташовані в полі зору повинна бути не більше ніж 200 кд/м². Необхідно обмежувати відбиту блискоті на робочих поверхнях відносно джерел природного і штучного освітлення. При цьому яскравість відблисків на екрані

ВДТ має не перевищувати 40 кд/м², а яскравість стелі в разі застосування системи відбитого освітлення – 200 кд/м².

6.2.4 Виробничий шум

Шум - безладне сполучення різних по силі і частоті звуків; здатний здійснювати несприятливу дію на організм працівника. Джерелом шуму є будь-який [процес](#), що викликає місцеву зміну тиску або механічні [коливання](#) в жорстких, водянистих або газоподібних середовищах. Джерелами шуму можуть бути двигуни, насоси, [компресори](#), турбіни, пневматичні та [електричні](#) інструменти, молоти, долота, [верстати](#), центрифуги, бункери та інші установки.

Реакція людини на шум різна. Деякі [люди](#) досить терплячі до шуму, у інших він викликає роздратування. Психологічна [оцінка](#) шуму в основному базується на понятті сприйняття, причому велике значення має внутрішнє налаштування до джерела шуму. Воно визначає, чи буде шум сприйматися як перешкода робочому процесу. Часто шум, який здійснюється самим працівником, не турбує його, в той час як невеликий шум, викликаний сусідами або іншим джерелом, має значний подразнюючий ефект.

Допустимі рівні звукового тиску у октавних смугах частот, еквівалентні рівні звуку на місцях праці встановлені санітарними нормами виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037-99 [5], витяг з яких подано в табл. 6.4

Таблиця 6.4 – Допустимі еквівалентні рівні шуму на робочих місцях

Вид професійної діяльності, місце праці	Еквівалентні рівні шуму, дБ
Творча діяльність, керівна робота з підвищеними вимогами, наукова діяльність, конструювання та проектування, програмування, викладання та навчання, лікарська діяльність; місця праці у приміщеннях – дирекції, проектно-конструкторських бюро, програмістів обчислювальних машин, у лабораторіях для теоретичних робіт та опрацювання даних, прийому хворих у медпунктах	50
Висококваліфікована робота, що вимагає зосередження, адміністративно-керівна діяльність, вимірювальні та аналітичні роботи у лабораторії; місця праці в приміщеннях цехового керівного апарату, контор, лабораторій	60

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

6.2.5 Виробничі випромінювання

Електромагнітні поля негативно впливають на організм людини, яка безпосередньо працює з джерелом випромінювання, а також на населення, яке мешкає поблизу джерел випромінювання.

В будь-якій точці ПК промислової частоти енергія магнітної складової поля, яка поглинається тілом людини, майже в 50 разів менша від енергії електричної складової цього поля, що поглинається тілом. Це дає змогу зробити висновок, що в діапазоні промислових частот дією магнітної складової поля на біологічний об'єкт можна знехтувати, а негативний вплив на організм обумовлений електричною складовою поля.

Вимоги до рівня неіонізувальних електромагнітних випромінювань, електростатичних та магнітних полів наведені у табл. 6.5.

Таблиця 6.5 – Допустимі параметри електромагнітних неіонізувальних випромінювань і електростатичного поля

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/кв.м
	за електричною складовою (Е), В/м	за магнітною складовою (Н), А/м	
60 кГц до 3 мГц	50	5	
3 кГц до 30 мГц	20	-	
30 кГц до 50 мГц	10	0,3	
30 кГц до 300 мГц	5	-	
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру			
УФ-С (220 - 280 нм)			0,001
УФ-В (280 - 320 нм)			0,01
УФ-А (320 - 400 нм)			10,0
в видимій частині спектру 400 - 760 нм			10,0
0,76 - 10,0 мкм			35,0-70,0

Продовження таблиці 6.5

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/кв.м
Напруженість електромагнітного поля	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/м	
Напруженість електричного поля ВДТ			20 кВ/м

Для зниження дії цих видів випромінювання рекомендується застосовувати [монітори](#) із зниженим рівнем випромінювання, встановлювати захисні екрани, а також дотримуватися регламентованих режимів праці та відпочинку.

6.3 Пожежна безпека

Будівлі та приміщення, в яких експлуатуються ПК та виконуються їх обслуговування, налагодження і ремонт повинні відповідати вимогам з пожежної безпеки. Неприпустимим є розташування приміщень категорій А і Б, а також виробництв з мокрими технологічними процесами поряд з приміщеннями, де розташовуються ПК, виконується їх обслуговування, налагодження і ремонт, а також над такими приміщеннями або під ними.

В приміщенні, де здійснювалося дослідження спеціальних алгоритмів роботи безпроводних систем при відсутності прямої видимості NLOS використовуються тільки негорючі речовини та матеріали у холодному стані, тому за ступенем вибухопожежної та пожежної небезпеки приміщення відноситься до категорії «Д». Пожежну небезпеку несуть у собі лише кабельні електропроводки до обладнання, що є припустимим для даної категорії приміщень.

За вогнестійкістю приміщення відноситься до другої категорії [27]. Робоча зона працівника відноситься до класу вибухонебезпечності В-Па та пожежонебезпечності П-Па, оскільки вибухонебезпечна концентрація пилу і волокон може утворюватися лише внаслідок аварії або несправності.

6.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Можливі причини виникнення пожежі у приміщенні, де здійснювалося дослідження підвищення ефективності систем синхронізації в цифрових засобах зв'язку такі:

- несправна електропроводка (іскріння, перегрів провідників, пересихання електроізоляційних матеріалів);
- використання електропобутових пристроїв (електрочайники, обігрівачі); попадання вологи на працююче електрообладнання;
- залишення без нагляду увімкннутих комп'ютерів, обчислювальної техніки та інших електроприладів.

Для запобігання виникнення пожежі доцільні такі заходи:

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

6.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Переважає більшість пожеж починається із невеличкого вогнища. Тому його своєчасну ліквідацію розглядаємо як профілактичний захід щодо недопущення його розширення до масштабів пожежі. Ліквідувати вогнище можна, усунувши одну із трьох умов виникнення горіння. Видалити горючу речовину із вогнища не завжди можна, а припинити доступ кисню до неї або/ї понизити її температуру можна завжди, якщо своєчасно використати первинні засоби гасіння пожеж: воду, пісок або вогнегасники.

У приміщенні на випадок виникнення пожежі для обмеження її

розповсюдження знаходиться переносний вуглекислотний вогнегасник типу ОУ-5, що відповідає нормам [10]. Підходи до засобів первинного пожежогасіння та відключення електросхем устаткування вільні.

У коридорі приміщення розташована схема евакуації людей при пожежі. Шляхи евакуації з відділу відповідають правилам пожежної безпеки. У будинку є два виходи, ширина коридору – 2-3 метри, ширина дверей – 0,8 м., двері відкриваються по ходу руху людей у випадку евакуації.

В цілому приміщення по категорії вибухо- і пожежонебезпечності та ступеню вогнестійкості відповідає нормам.

6.4 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

Проведено аналітику при багатопроменовому поширенні сигналу в умовах відсутності прямого сигналу між передавачем і приймачем (NLOS) та при наявності такого сигналу (LOS). Показано, що для NLOS розподіл амплітуди обвідної підпорядковується закону Релея, а для LOS - закону Райса.

Описано принцип визначення багатопроменового розсіювання затримки каналу та його зворотного значення — когерентності каналу, яка має важливе значення в системах зв'язку. Також розглянуто канали, які мають постійну статистику протягом кількох символних інтервалів, які класифікуються як канали з повільними завмираннями, на відміну від тих, чия статистика змінюється швидко.

Показано причини та механізм виникнення внутрішньосимвольної та міжсимвольної інтерференції, а також їх вплив на спотворення інформації та методи боротьби з цими явищами. Визначено напрямки забезпечення ефективної передачі даних в безпроводних мережах зв'язку в умовах відсутності прямої видимості.

Розглянуто концепцію технологій ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням OFDM та множинного доступу з ортогональним частотним розділенням каналів OFDMA. Це близькі алгоритми за процедурою формування сигналів та найбільш ефективні для роботи в умовах NLOS.

В обох технологіях використання множини піднесійних частот, на кожній з яких передається окремий блок даних, потребує послідовно-паралельного перетворення цифрового потоку. Це вимагає збільшення тривалості сформованого символу, що у свою чергу створює передумови для уникнення міжсимвольної інтерференції як через велику тривалість сигналу, так і через можливість введення захисного проміжку (циклічного префіксу).

Показано, що на кожній піднесійній може застосовуватися своя схема модуляції залежно від рівня селективної завади, причому це відбувається адаптивно.

Розглянуто ефективність двох важливих алгоритмів роботи безпроводних систем в умовах NLOS - beamforming та interleaving.

Показано, що в умовах NLOS алгоритм beamforming дозволяє зменшити вплив відбитих сигналів, фокусуючи енергію на найбільш сприятливих шляхах. Крім цього, використання beamforming дозволяє мінімізувати вплив від інших відбитих сигналів або сторонніх джерел шуму, підвищуючи загальну якість зв'язку.

Алгоритм interleaving є основним елементом завадостійкого кодування, спрямованим на боротьбу з груповими помилками. Його сутність у тому, що здійснюється перетворення групових помилок у одиничні, і це робить передачу інформації практично нечутливою до різноманітних завмирань, які виникають в умовах NLOS та LOS. Отже, частотне перемежування разом з виправляючими CRC-кодами виключає втрату даних при селективних завмираннях декількох несійних, що в технології OFDM призводить до злитих цифрових помилок.

Також розглянуто технології рознесеного прийому, такі як просторове, частотне, часове та багатопроменеве рознесення, які використовуються для підвищення надійності безпроводних систем в умовах багатопроменевого поширення сигналів. Визначено методи когерентного та некогерентного прийому складених сигналів та проаналізовано їх імовірності помилок при різних методах прийому в умовах флуктуаційних завад.

Шляхом моделювання з'ясовано, що відношення енергії сигналу до односторонньої спектральної щільності білого шуму має менший вплив на ймовірність помилки, ніж тривалість багатопромених завмирань і збільшення тривалості завмирань сприяє зменшенню ймовірності помилки.

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 Ю.М. Концептуальні особливості реалізації безпроводних сенсорних мереж / Ю.М. Бойко, В.В. Мішан // Вісник Хмельницького національного університету. – Технічні науки. – Хмельницький . – 2010. – №2. – С. 94 -98.
3. Бойко М.П. Системи стільникового зв'язку: Конспект лекцій. – Одеса: ОНАЗ, 2004. –76с.
4. Ільченко М.Ю. Основи теорії телекомунікацій; навч. посібник; за заг. ред. М. Ю. Ільченка. – К.: ІСЗЗІ НТУУ «КПІ», 2010. – 788 с.
5. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Сучасні телекомунікаційні системи. – К.: Наук. думка, 2008. – 328 с.
6. Т.М. Наритник, С.О. Осипчук, Л.О. Уривський Особливості формування сигнально-кодових конструкцій на основі технології Wi-Fi для побудови телекомунікаційних систем терагерцового діапазону // Електронне наукове фахове видання «Проблеми телекомунікацій». №2 (17). 2015.
7. Costas.J.P.”Synchronous communications proceedings of the IRE”, Vol.47, p.p.2058-2068, 1959.
8. Marc Stebber J. PSK Demodulation (Part 1), WJ Communications, Inc,2001.
9. Kikkert C.J. Digitally demodulating binary phase shift keyed data signals, In Practice, Canberra, 1999.
10. Поширення земних радіохвиль та мобільний зв'язок [текст] / Л. М. Логачова, Т. І. Бугрова / Навчальний посібник. –Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. –236 с.
11. Зюбіна Р. В. Широкосмугові бездротові технології / Р. В. Зюбіна, Ю. П. Бойко // Наукоємні технології: науково-технічна конференція студентів та молодих учених, 11–15 листопада 2013 р. — К. : НАУ, 2013. — С. 29.

12. Чернихівський Є.М. Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж: навчальний посібник / Є.М. Чернихівський. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 272 с.

13. Одарченко Р.С., Ткаліч О.П., Полігенько О.О. Експериментальні дослідження пропускну здатності мереж стандарту IEEE 802.11n //Наукоємні технології. – 2013. – № 4 (20). – С.377-383.

14 Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології : підручник Частина 2, за загальною редакцією проф. В.В. Поповського - Х:ТОВ “Компанія СМІТ”, (Ч.2).–.2010. – 470 с.

15. Маньшін І.С., Хачіров Е.Ф. Методи застосування програмноконфігурованого радіо у системах мобільного зв'язку / І.С.Маньшін, Е.І. Хачіров // Матеріали шостої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку EMC2020». – Харків, ХНУРЕ. Том 4. – 2020. – с. 72-74

16. Системи і технології цифрового телебачення: навчальний посібник / В.А. Лошаков, Т.М. Наритник, С.О. Сабурова та ін. ; за заг. ред. проф. В.А. Лошакова. — К.: Талком, 2022. — 285 с.

17. В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман. Телекомунікаційні мережі. Київ, Техніка, 2001р. – 526 с.

18. Беркман Л. Н. Методы когерентного приема многопозиционных АФМ сигналов многоканальных модемов / Л. Н. Беркман // Сб. научных трудов (Центральный научно-исследовательский институт связи). – 1987. – С. 44-50.

19. Поповський В. В. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В. В. Поповський, В. Ф. Олійник та ін.]. – Харків : СМІТ, 2006. – 564 с.

20. Стеклов В. К. Оптимізація параметрів багатоканальних модемів / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман, О. І. Чумак // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2002. – №2. – С. 124-131.

21. Стеклов В. К. Проектування телекомунікаційних мереж / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман. – Київ : Техніка, 2002. – 792 с.

22. ДСТУ OHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог OHSAS 18001:2007 (OHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с.

23. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

24. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

25. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

26. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

27. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=71028.

28. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

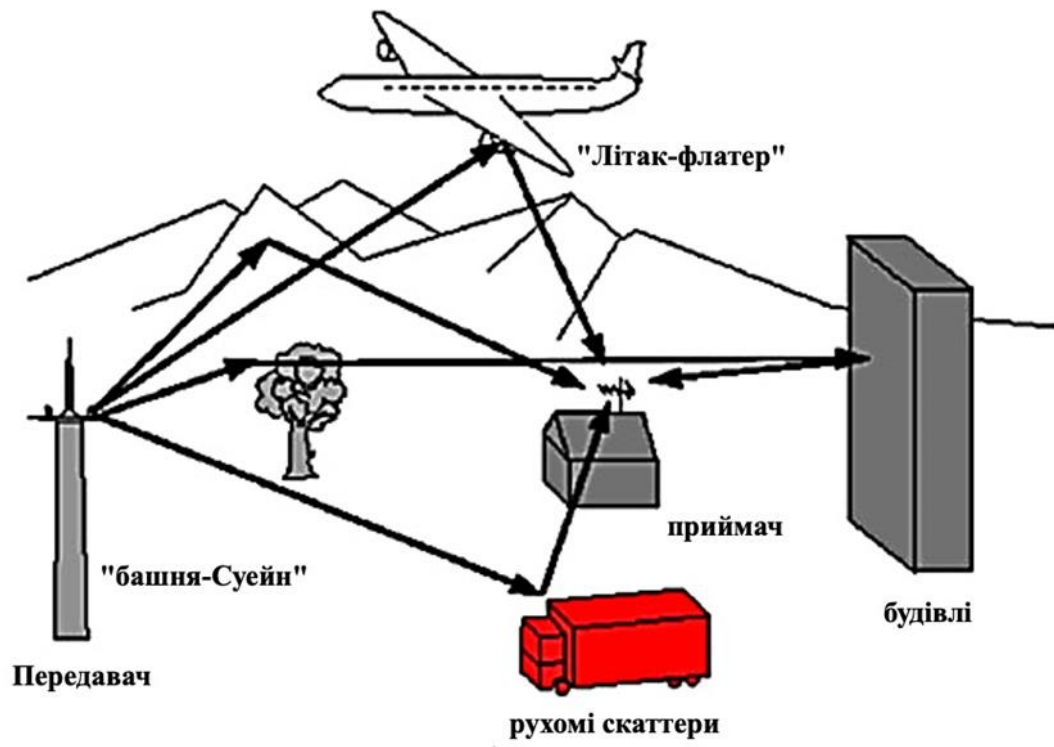
29. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.

30. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php

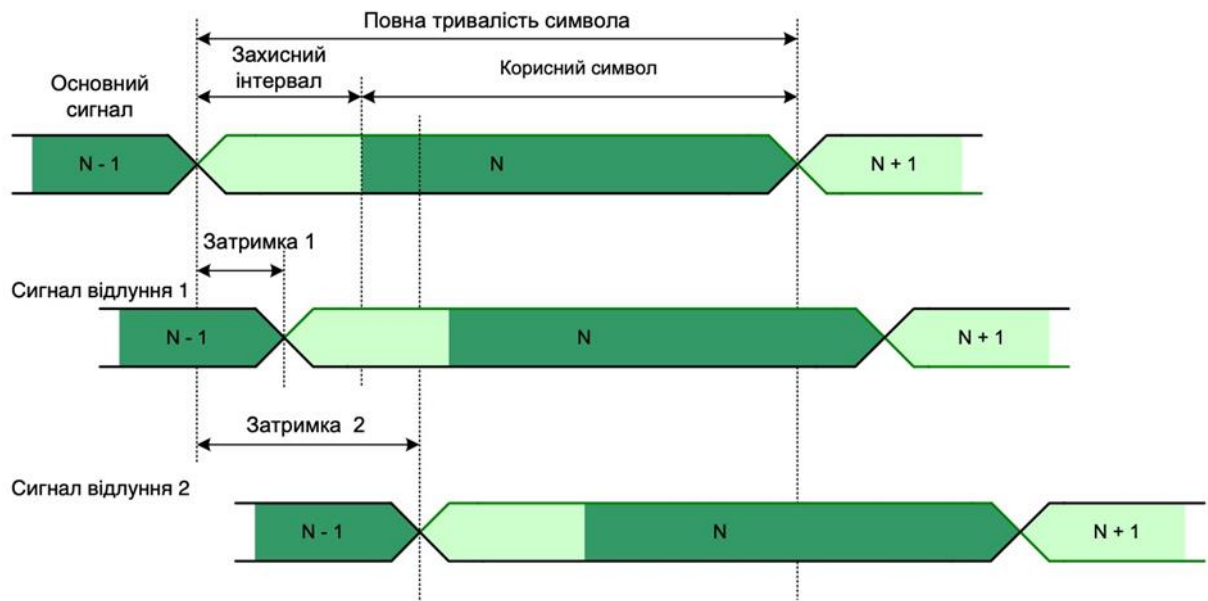
31. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

Додаток А
(обов'язковий)

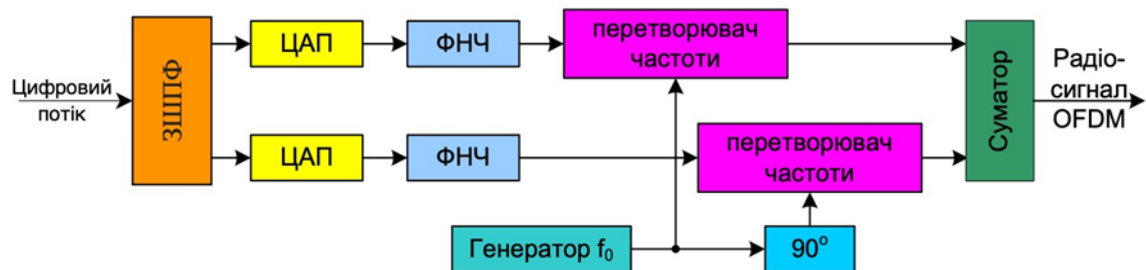
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
СПЕЦІАЛЬНІ АЛГОРИТМИ РОБОТИ БЕЗПРОВІДНИХ СИСТЕМ
ПРИ ВІДСУТНОСТІ ПРЯМОЇ ВИДИМОСТІ NLOS
назва бакалаврської кваліфікаційної роботи



Багатопроменеве поширення сигналу



Ілюстрація міжсимвольної інтерференції



Структурна схема формувача OFDM-радіосигналу за допомогою зворотного швидкого перетворення Фур'є (ЗШПФ)

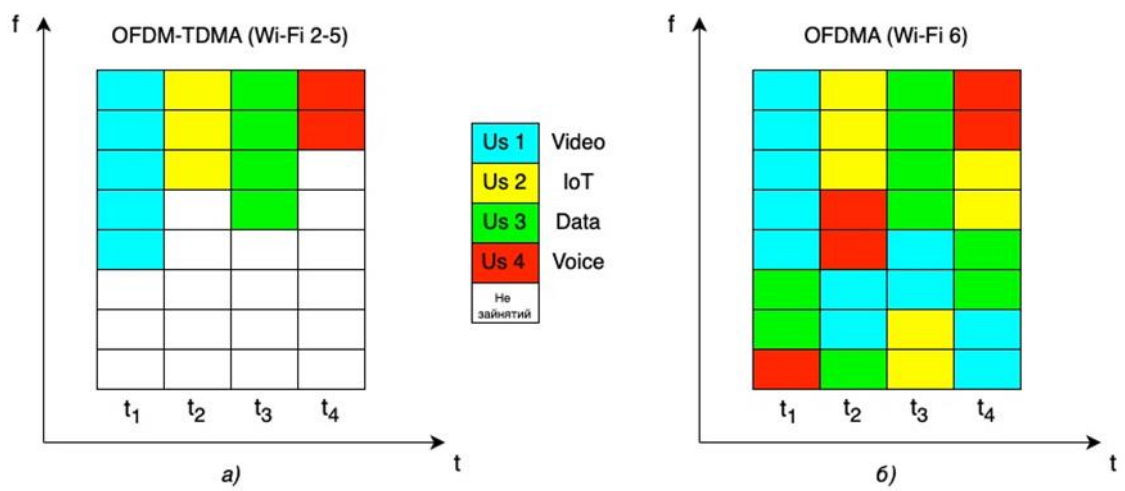
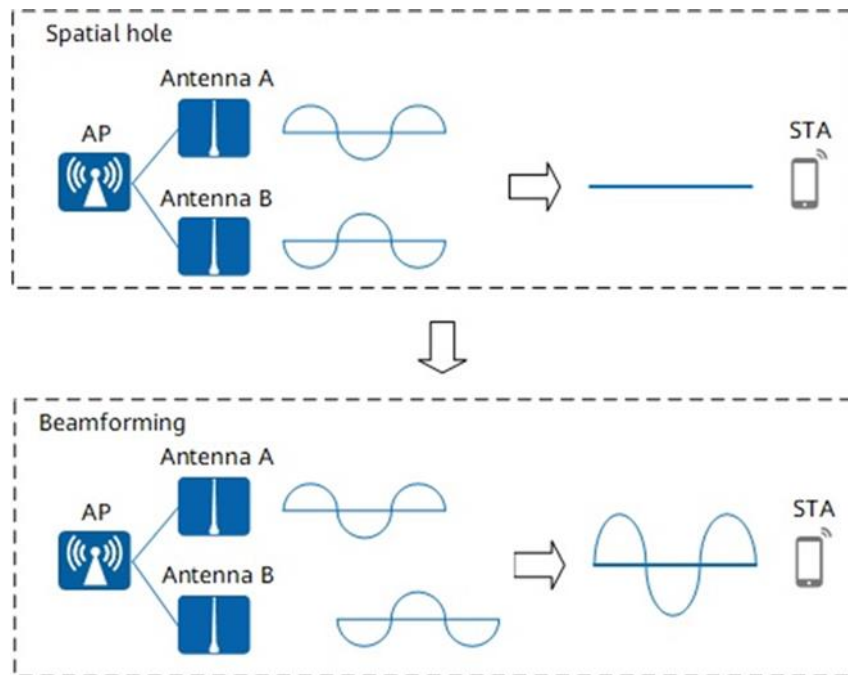


Рисунок 2.6 – Розподіл каналного ресурсу:

- а) при послідовному обслуговуванні користувачів системами Wi-Fi 2-5;
 б) при паралельному обслуговуванні користувачів системами Wi-Fi 6



До пояснення технології beamforming

Вихідний порядок

1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Після перемежування

5	2	4	1	3	6	5	2	4	1	3	6
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

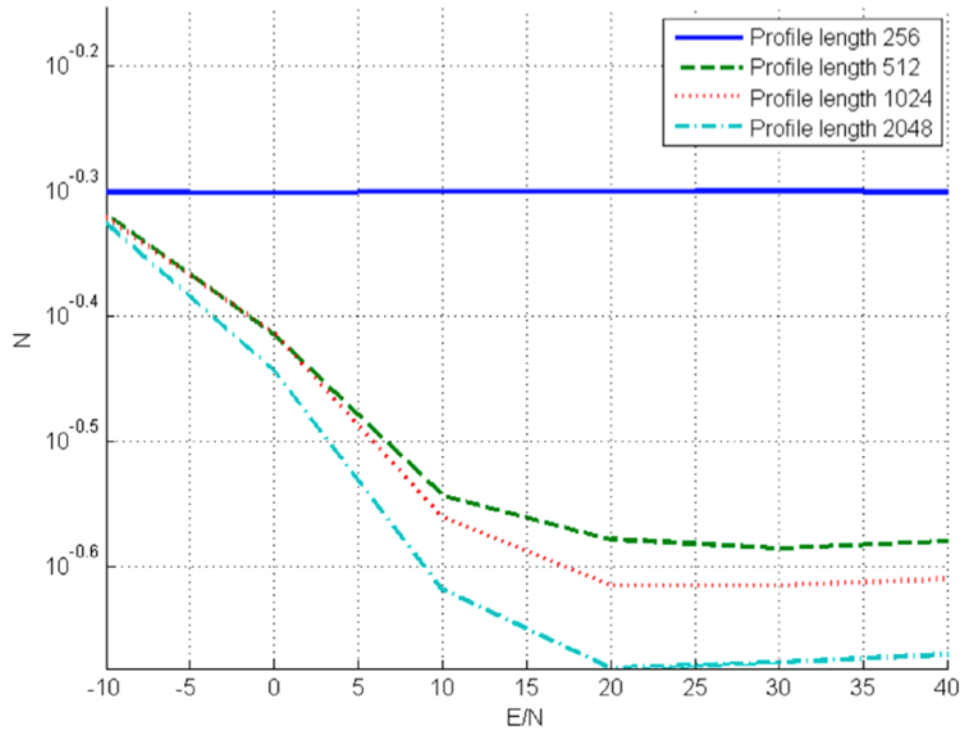
Після передачі сигналу по радіозв'язку і впливу групових помилок

5	3	6	1	4	2	5	3	6	1	4	2
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

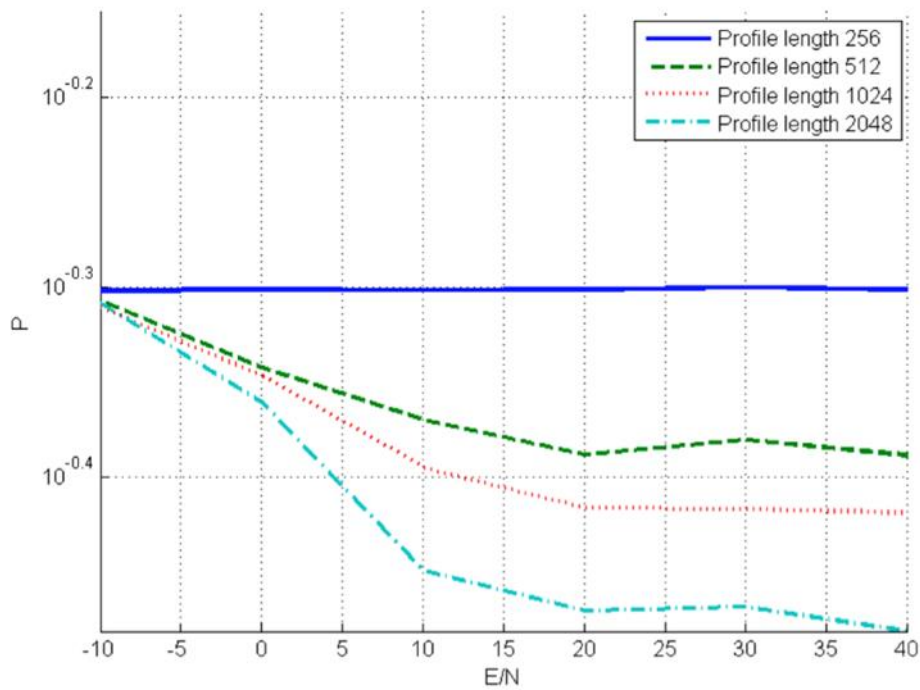
Відновлений порядок

1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Приклад дії перемежування (interleaving)



Ймовірність помилки системи зв'язку при передаванні сигналів через релєйські канали з $M=2$ та $df=2E+6$



Ймовірність помилки системи зв'язку при передаванні сигналів через релєйські канали з $M=4$ та $df=2E+6$

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Спеціальні алгоритми роботи безпроводних систем при відсутності прямої видимості NLOS

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 13,62 %

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 М.В.
(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)

Рощаховський Д. І.

(прізвище, ініціали)