

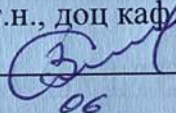
Бакалаврська дипломна робота на тему:

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛУ СТАНДАРТУ LTE

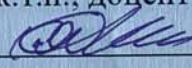
Виконав: студент 2-го курсу, групи ПЗТ-22мс
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

 Черкес С.В.

Керівник: к.т.н., доц каф. ІКСТ

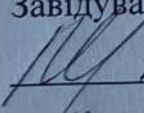
 Воловик А.Ю.
« 11 » 06 2024 р.

Рецензент: к.т.н., доцент каф. ІРТС

 Осадчук Я.О.
« 11 » 06 2024 р.

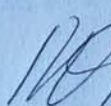
Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

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

Вінницький національний технічний університет
 Факультет інформаційних електронних систем
 Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
 Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
 (шифр і назва)
 Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
 (шифр і назва)
 Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІКСТ

 **д.т.н., професор В.М. Кичак**
 «06» 05 2024 року

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

Черкесу Євгену Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Оцінка параметрів сигналу стандарту LTE

керівник роботи Воловик Андрій Юрійович, канд. техн. наук, доцент,
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 затверджені наказом ВНТУ від "11" березня 2024 року № 80

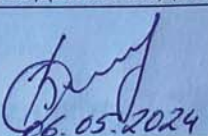
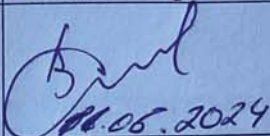
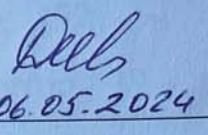
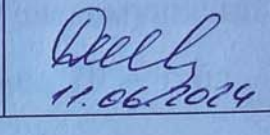
2. Строк подання студентом роботи: 07 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: тип модуляції – QPSK; режим зв'язку – дуплексний;
тип мережі – мобільна стільникова мережа; коефіцієнт помилок BER – не
більше 10^{-8} , технологія поширення радіосигналів – MIMO.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, аналіз методів ідентифікації та оцінки параметрів
цифрових сигналів, оцінка параметрів сигналу стандарту LTE, імітаційне
моделювання та ідентифікація сигналів LTE, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
залежність оцінки значень кореляційних функцій від співвідношення
сигнал/шум сигналу LTE, залежність точності ідентифікації первинного
синхросигналу від співвідношення сигнал/шум сигналу LTE, залежність НСКЗ
помилки оцінки сигнал/шум від поточного відношення сигнал/шум при
ідеальній та неідеальній синхронізації для смуг сигналу, залежність
нормованих значень кореляційних функцій від поточного відношення
сигнал/шум сигналу LTE.

6. Консультанти розділів роботи

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

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

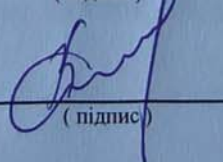
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент

Керівник роботи


(підпис)


(підпис)

Черкес Є.В.

Воловик А.Ю.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Черкес Є.В. Оцінка параметрів сигналу стандарту LTE – бакалаврська дипломна робота студента спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка – Вінниця: ВНТУ 2024 р. 84 стор., 39 – рис., 10 – табл., 29 – бібл. – українською мовою.

Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження та вдосконалення методів оцінки параметрів сигналу стандарту LTE з метою покращення якості та ефективності мобільних комунікаційних систем.

У даній бакалаврській дипломній роботі дослідження спрямоване на аналіз і оцінку основних параметрів сигналу LTE, таких як рівень сигналу, якість сигналу, інтерференція та пропускна здатність. Вивчення цих параметрів дозволяє визначити стан мережі, виявити проблемні зони покриття та здійснити оптимізацію мережевих ресурсів.

У рамках роботи були проведені експериментальні вимірювання параметрів сигналу LTE у різних умовах експлуатації мережі, включаючи міські та сільські райони. Аналіз результатів вимірювань допоможе ідентифікувати основні фактори, що впливають на якість сигналу, та запропонувати рекомендації щодо покращення продуктивності мережі.

У роботі також розглянуто питання охорони праці, включаючи гігієну праці, мікроклімат, освітлення, шум, випромінювання, пожежну безпеку та технічні рішення систем пожежної профілактики та захисту.

Ключові слова: LTE, оцінка параметрів сигналу, пропускна здатність, оптимізація мережі, мобільний зв'язок, мережеві ресурси, покриття мережі.

ANNOTATION

Cherkes Y.V. Evaluation of LTE Signal Parameters – Bachelor's Thesis for the degree in Specialty 172 – Telecommunications and Radio Engineering – Vinnytsia: VNTU, 2024. 84 pages, 39 figures, 10 tables, 29 references – in Ukrainian.

The aim of this qualification work is to research and improve methods for assessing the parameters of LTE standard signals in order to enhance the quality and efficiency of mobile communication systems.

In this bachelor's thesis, the research focuses on the analysis and evaluation of the main LTE signal parameters, such as signal strength, signal quality, interference, and throughput. Studying these parameters allows determining the network condition, identifying problem coverage areas, and optimizing network resources.

Experimental measurements of LTE signal parameters were conducted under various network operating conditions, including urban and rural areas. The analysis of measurement results will help identify the main factors affecting signal quality and propose recommendations for improving network performance.

The work also addresses occupational safety issues, including workplace hygiene, indoor climate, lighting, noise, radiation, and fire safety, with technical solutions for fire prevention and protection systems.

Keywords: LTE, signal parameter evaluation, throughput, network optimization, mobile communication, network resources, network coverage.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ	12
1.1 Ідентифікація параметрів для оцінки сигналів LTE	12
1.2 Основні особливості стандарту LTE	16
1.2.1 Методи множинного доступу	17
1.2.2 Параметри фізичного рівня стандарту LTE	20
1.2.3 Опорні сигнали та синхронізація в LTE	23
1.2.4 Типи каналів в стандарті 4G LTE	24
1.3 Структура та характеристики моделі сигналу LTE	26
1.4 Висновки до розділу	32
2 ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛУ СТАНДАРТУ LTE	33
2.1 Визначення ширини смуги LTE сигналу	33
2.2 Ідентифікація сигналу LTE	40
2.3 Детектування синхронізаційного сигналу	42
2.4 Висновки до розділу	48
3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ СИГНАЛІВ LTE	49
3.1 Визначення напрямку передачі сигналу LTE	49
3.2 Моделювання структури сигналу з ФМ та КАМ модуляціями	51
3.3 Моделювання характеристик якості сигналу	53
3.4 Висновки до розділу	60
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	61
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи	61
4.1.1 Обладнання робочого місця	61
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	64

4.2.1 Мікроклімат	64
4.2.2 Склад повітря робочої зони.....	65
4.2.3 Виробниче освітлення	67
4.2.4 Виробничий шум.....	68
4.2.5 Виробничі випромінювання.....	69
4.3 Пожежна безпека.....	70
4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі	71
4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту.....	71
4.4 Висновки до розділу	72
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75
Додаток А (обов'язковий). Ілюстративна частина	79
Додаток Б (обов'язковий). Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	84

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АБГШ – адитивний білий гаусовський шум
АКФ – автокореляційна функція
БПФ – швидке перетворення Фур'є
ВКФ – взаємкореляційна функція
КАМ – квадратурна амплітудна модуляція
КФ – кореляційна функція
МСЭ – Міжнародний Союз Електрозв'язку
НСКЗ – нормоване середньоквадратичне значення
ОБПФ – зворотне швидке перетворення Фур'є
ОСШ – відношення сигнал/шум
ПМ – запропонований метод
РБ – ресурсний блок
СКО – середньоквадратичне відхилення
ФМ – фазова модуляція
ЦП – циклічний префікс
ARQ – Automatic Repeat Reques
CFI – Control Frame Indicator
CQI – Channel Quality Indicator
DA – Data–Aided
DM–RS - Demodulation Reference Signals
DwPTS – Downlink Pilot Time Slot
EPA –Extended Pedestrian A
ETU – Extended Typical Urban
EVA – Extended Vehicular A
FDD – Frequency Division Duplex
FFT – Fast Fourier Transform
GP – Guard Period

IFFT – Inverse Fast Fourier Transform

LTE – Long Term Evolution

MAC – Media Access Control

MBMS – Multimedia Broadcast и Multicast

MIB – Master Information Block

NDA – Non-Data-Aided

NMSE – Normalized Mean Square Error

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing

PBCH – Physical Broadcast Channel

PCFICH – Physical Control Format Indicator Channel

PDCCH – Physical Downlink Control Channel

PDSCH – Physical Downlink Shared Channel

PHICH – Physical Hybrid Automatic Repeat Reques Indicator Channel

PMCH – Physical Multicast Channel

PSS – Primary Synchronization Signal

PUCCH – Physical Uplink Control Channel

PUSCH – Physical Uplink Shared Channel

QAM – Quadrature Amplitude Modulation

QPSK – Quadrature Phase Shift Keying

SC-OFDM – Single-Carrier Orthogonal Frequency Division Multiplexing

SIB – System Information Blocks

SNR – signal-to-noise ratio

SRS – Sounding Reference Signal

SSS – Secondary Synchronization Signal

TDD – Time Division Duplex

UpPTS – Uplink Pilot Time Slot

WCDMA – Wideband Code Division Multiple Access

ВСТУП

Актуальність. Нинішні тенденції у розвитку мобільних комунікаційних систем ставлять перед нами серйозні вимоги щодо якості зв'язку і швидкості передачі даних. Згідно з щорічним прогнозом Cisco® Visual Networking Index™ Global Mobile Data Traffic Forecast for 2023 to 2028 («Індекс розвитку візуальних мережевих технологій: прогноз розвитку світового мобільного трафіку на 2023-2028 роки»), обсяг світового мобільного трафіку протягом наступних 4 років збільшиться в 11 разів і може досягти 490 ексабайт у 2028 році. Величезні темпи зростання трафіку в значній мірі зумовлені швидким розвитком мобільних пристроїв, таких як телефони, смартфони, планшети, а також їхньою великою популярністю серед користувачів. Для вирішення завдань задоволення потреб сучасних абонентів мобільних мереж нам допоможе подальше удосконалення та розширення покриття технологій мобільного зв'язку 4G LTE [1].

Нові напрями в розвитку мереж зв'язку передбачають можливість одночасного використання різних стандартів на одному пристрої. Це реалізується за допомогою систем, що мають програмовану архітектуру, таких як програмно-визначене радіо (Software Defined Radio) і когнітивне радіо (Cognitive Radio) [2].

Технологія програмно-визначеного радіо дозволяє замінити різноманітні радіоприймачі обмеженою кількістю апаратних блоків, що працюють під керуванням програмного забезпечення. Це спростить конструкції, зменшить їх вартість і покращить характеристики, забезпечивши підтримку будь-яких видів модуляції. Однією з ключових задач у таких системах є ідентифікація прийнятого сигналу та оцінка його параметрів, від точності яких залежить правильна робота системи [3].

У випадку когнітивного радіо система зв'язку користується технологією адаптивного налаштування параметрів. Це дозволяє ефективно

використовувати частотний ресурс на місцевому рівні, що є одним з основних обмежених ресурсів. З урахуванням вищезазначеного, задача дослідження полягає у ідентифікації та оцінці параметрів сигналу стандарту LTE, що є одним з підтримуваних стандартів у сучасних інтегрованих системах зв'язку [4].

Аналіз останніх досліджень з оцінки параметрів сигналу стандарту LTE свідчать про значний прогрес у цій області. Ряд провідних науковців і виробників активно вивчають та вдосконалюють методи і алгоритми для точної оцінки різних параметрів LTE-сигналів [1-2].

Дослідження фокусуються на таких ключових аспектах, як ідентифікація сигналу, визначення його модуляції, оцінка частоти носійної та рівня сигнал-шум, серед іншого. Важливими напрямками є адаптація методів оцінки до різних умов передачі сигналу, включаючи змінність каналу та різноманітність шумів та перешкод. Останні досягнення в цій області відображаються у вдосконаленні якості прийому, підвищенні ефективності передачі даних та забезпеченні стабільності роботи мобільних систем зв'язку [4].

Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження та вдосконалення методів оцінки параметрів сигналу стандарту LTE з метою покращення якості та ефективності мобільних комунікаційних систем.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати *такі задачі*:

- дослідити методи ідентифікації параметрів для оцінки цифрових сигналів;
- визначити структуру та характеристики досліджуваного сигналу LTE;
- провести визначення ширини смуги сигналу LTE;
- дослідити методи ідентифікації та детектування синхронізаційного сигналів стандарту LTE;
- провести імітаційне моделювання структури сигналу з різними типами модуляції;
- провести моделювання характеристик якості сигналу стандарту LTE.

Об'єктом дослідження є параметри сигналу стандарту LTE.

Предметом дослідження є методи та алгоритми оцінки параметрів сигналу стандарту LTE.

Новизна одержаних результатів полягає в розробці та вдосконаленні методів оцінки параметрів сигналу LTE, враховуючи актуальні вимоги до якості та продуктивності мобільних зв'язкових систем. Це означає створення нових алгоритмів, які забезпечать точність, стійкість та ефективність оцінки різних характеристик сигналу LTE в реальних умовах. Отримані результати можуть бути корисними для подальшого розвитку мобільних мереж та оптимізації передачі даних.

Методи досліджень. Для вирішення визначених завдань використовувалися методи математичної статистики і теорії ймовірностей, теорії електричних мереж, методи математичного аналізу, а також імітаційне моделювання у середовищі Matlab/Simulink.

Практичне значення полягає у тому, розроблені методи та алгоритми ідентифікації та оцінки параметрів забезпечують їх ефективне виконання навіть при низькому співвідношенні сигнал/шум та у присутності перешкод. Це дозволяє використовувати їх у реальних радіосистемах, системах когнітивного радіо, системах аналізу цифрових сигналів, а також для розв'язання завдань радіомоніторингу та радіорозвідки. Досліджено, що циклічний префікс може бути використаний не лише для подолання міжсимвольної інтерференції та проведення символьної синхронізації, а також для визначення та оцінки ширини смуги сигналу стандарту LTE.

Апробація результатів роботи. Під час проведення LIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ у 2024 році були висвітлені та обговорені ключові концепції даної бакалаврської дипломної роботи.

Публікації результатів бакалаврської дипломної роботи. Основні аспекти бакалаврської дипломної роботи було висвітлено у тезах науково-технічних конференцій за відповідним напрямом досліджень.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ

1.1 Ідентифікація параметрів для оцінки сигналів LTE

Існує два основних типи методів ідентифікації цифрових методів модуляції: ті, що базуються на теорії розпізнавання образів (часто відомі як *pattern recognition*), і ті, що ґрунтуються на теорії прийняття рішень (*decision theoretic*).

Методи першого типу включають два етапи ідентифікації: на першому етапі здійснюється вилучення ознак або набору ознак з прийнятого сигналу, який піддається впливу шумів та різних ефектів каналу зв'язку; на другому етапі отримана оцінка ознак порівнюється з теоретичним набором значень опорних ознак, після чого остаточне рішення приймається шляхом вибору найближчої опорної ознаки відповідно до певної метрики. Спрощена структурна схема цього методу показана на рис. 1.1 [5].

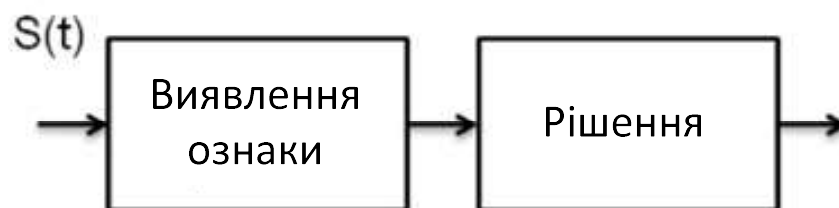


Рисунок 1.1 – Класифікатор на основі теорії розпізнавання образів

Цей підхід відрізняється своєю надійністю та низькою обчислювальною складністю, і методи, що ґрунтуються на розпізнаванні образів, нечутливі до індивідуальних характеристик сигналу. Тому вони широко використовуються для розпізнавання типів модуляції. На цю тему було опубліковано багато

робіт, які пропонують різні ознаки для ідентифікації видів модуляції сигналу, проте слід зазначити, що методи, засновані на розпізнаванні образів, часто вважаються менш оптимальними. З іншого боку, використання отриманих таким чином рішень обмежується конкретним набором систем [6].

Методи другого класу, засновані на теорії прийняття рішень, можна також розділити на дві групи: перша використовує метод максимальної правдоподібності для перевірки гіпотез, а друга – метод мінімальної відстані.

На рис. 1.2 наведено структурну схему класифікатора, що базується на перевірці гіпотез за методом максимальної правдоподібності.

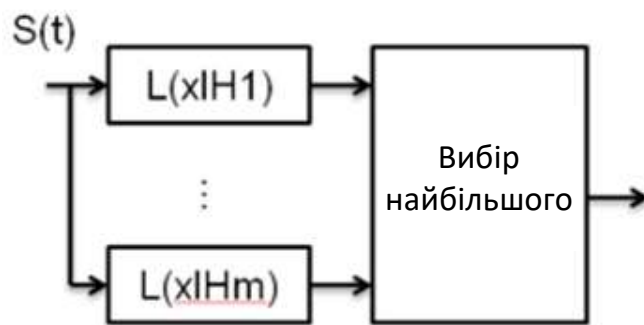


Рисунок 1.2 – Класифікатор на основі критерію максимальної правдоподібності

Ці методи вважаються оптимальними, оскільки вони забезпечують високу точність і ефективність. Проте значним недоліком стають високі вимоги до обчислювальних ресурсів у випадках великої кількості гіпотез. Крім того, метод чутливий до відхилень статистичної моделі від припущеної, наприклад, при фазовому і частотному зміщенні, замираннях та імпульсних перешкодах. З урахуванням переваг і недоліків методів на основі теорії розпізнавання образів та методів на основі теорії прийняття рішень, в цій роботі найбільший інтерес викликають саме методи на основі теорії розпізнавання образів.

В таких методах в якості ознак може використовуватись:

максимальне значення спектральної щільності потужності для нормованої амплітуди:

$$\gamma_{\max} = \frac{\max \left| DFT\left(\frac{S(n)}{m_a} - 1\right) \right|^2}{N_s}, \quad (1.1)$$

де DFT - дискретне перетворення Фур'є; $S(n)$ - прийнятий сигнал; N_s - кількість відліків, що аналізуються; $\max$ - операція вираховування максимуму.

Відхилення (девіація) абсолютного значення центрованої нелінійної компоненти миттєвої фази [6]:

$$\sigma_{ap} = \sqrt{\frac{1}{N_s} \left(\sum \varphi_{NL}^2(i) \right) - \left(\frac{1}{N_s} \sum |\varphi_{NL}(i)| \right)^2}. \quad (1.2)$$

де φ_{NL} - центрована нелінійна компонента миттєвої фази.

Девіація центрованої нелінійної компоненти миттєвої фази [6]:

$$\sigma_{dp} = \sqrt{\frac{1}{N_s} \left(\sum \varphi_{NL}^2(i) \right) - \left(\frac{1}{N_s} \sum |\varphi_{NL}(i)| \right)^2}. \quad (1.3)$$

Спектральна симетрія щодо носійної частоти сигналу визначається за наступними виразами:

$$P = \frac{P_L - P_U}{P_L + P_U}; \quad (1.4)$$

$$P_L = \sum_{n=1}^{f_{cn}} |X[n]|^2; P_U = \sum_{n=f_{cn}+2}^{2f_{cn}} |X[n]|^2; X(n) = \sum_{k=0}^{N_s-1} x[k] e^{-jkn2\pi/N_s};$$

$$f_{cn} = \frac{f_c N_s}{f_s} - 1, \quad (1.5)$$

де $X[n]$ - дискретне перетворення Фур'є (ДПФ) сигналу.

Девіація абсолютного значення центрованої нелінійної компоненти миттєвої амплітуди [6]:

$$\sigma_{aa} = \sqrt{\frac{1}{N_s} \left(\sum_{i=1}^{N_s} \sum a_{cn}^2(i) \right) - \left(\frac{1}{N_s} \sum |a_{cn}(i)| \right)^2}. \quad (1.6)$$

Відхилення абсолютного значення центрованої нелінійної компоненти миттєвої частоти [6]:

$$\sigma_{af} = \sqrt{\frac{1}{N_s} \left(\sum f_N^2(i) \right) - \left(\frac{1}{N_s} [f_N(i)] \right)^2}. \quad (1.7)$$

де $f_N(i)$ - нормована миттєва частота.

$$\sigma_{af} = \sqrt{\frac{1}{N_s} \left(\sum f_N^2(i) \right) - \left(\frac{1}{N_s} [f_N(i)] \right)^2}. \quad (1.8)$$

Також використовуються такі ключові параметри: кореляція між синфазною та квадратурною компонентами сигналу, дисперсія інтервалу перетину нуля (zero-crossing), дисперсія величини перетворення сигналу після видалення пікових амплітуд, функція щільності ймовірності фази та її статистичні моменти, моменти, тощо [7].

Аналогічні підходи застосовуються і для оцінки параметрів сигналів OFDM, де часто використовуються методи на основі кореляційних властивостей і властивостей стаціонарності. До основних оцінюваних параметрів систем OFDM можна віднести: ширину смуги сигналу, кількість підносійних, тривалість символу, тривалість захисного інтервалу, параметри часової та частотної відхиленості, співвідношення сигнал/шум та інше. Дослідження методів оцінки параметрів OFDM також є актуальними [8].

Сучасні дослідження в галузі LTE переважно спрямовані на адаптацію процедур, описаних у стандарті. При цьому методи ідентифікації та оцінки параметрів сигналу стандарту LTE без використання додаткової інформації практично не досліджені, хоча ця область також є цікавою та перспективною. За останні двадцять років напрямки ідентифікації та оцінки параметрів цифрових методів модуляції, зокрема OFDM, активно розвивалися і можуть стати перспективою для подальшого розвитку інтелектуальних приймачів. До цих напрямків відносяться системи когнітивного радіо, які наразі набирають популярність, системи програмно-визначеного радіо та різноманітні адаптивні системи. Розробка спеціалізованих методів для стандарту LTE може підвищити точність методів, які застосовуються в OFDM загалом [10].

1.2 Основні особливості стандарту LTE

Для реалізації фізичного рівня LTE використовується технологія ортогонального частотного розділення сигналів (OFDM). Крім того, в мережах LTE використовується принцип множинного доступу (MIMO), що збільшує пропускну здатність каналу (просторовий мультиплекс) і підвищує надійність сигналу. Разом ці дві технології відрізняють LTE від мереж третього покоління, які базуються на множинному доступі з кодовим розділенням (CDMA) [7].

1.2.1 Методи множинного доступу

У вихідному каналі використовується метод мультиплексування з ортогональним частотним розділенням сигналів (OFDM). Це означає, що доступний частотний діапазон розділяється на кілька підносійних, через які дані передаються паралельно. Ортогональність частот забезпечує відсутність міжсимвольної інтерференції. Розділення каналу на вузькі смуги дозволяє послабити сигнал плавно, уникнувши при цьому складних коригувань частоти. Системи зв'язку на основі OFDM мають бути лінійними для збереження ортогональності передаваних сигналів [5].

Для зменшення рівня шуму та уникнення інтерференції кожному передавачу виділяються певні смуги спектру. Початковий потік послідовних даних перетворюється на паралельний, причому швидкість передачі в кожному каналі зменшується пропорційно кількості каналів. Це збільшує час передачі кожного біту, але зменшує ймовірність помилок та спотворень, залишаючи загальну швидкість передачі потоку незмінною [7].

Інформаційні символи модулюються і комбінуються в передавачі за допомогою оберненого швидкого перетворення Фур'є (ОШПФ). В приймачі відбувається відновлення потоку даних (пряме ШПФ).

Зазвичай у каналі спостерігається розсіювання в часі, коли різні частини передаваного сигналу приймаються з різними затримками через множинні відбиття та розсіювання. Це призводить до часткової втрати ортогональності та виникнення інтерференції як між бітами всередині символу, так і між самими символами. Щоб уникнути перекриття на початку OFDM-символу, вставляється циклічний префікс (ЦП). Це означає розділення тривалості символу T_S на корисну частину T_U та захисний інтервал Δ . Частина сигналу, яка передається протягом захисного інтервалу, є циклічним префіксом OFDM-символу, що означає, що протягом цього інтервалу передається копія частини OFDM-символу, взята з «кінця» корисного інтервалу [7].

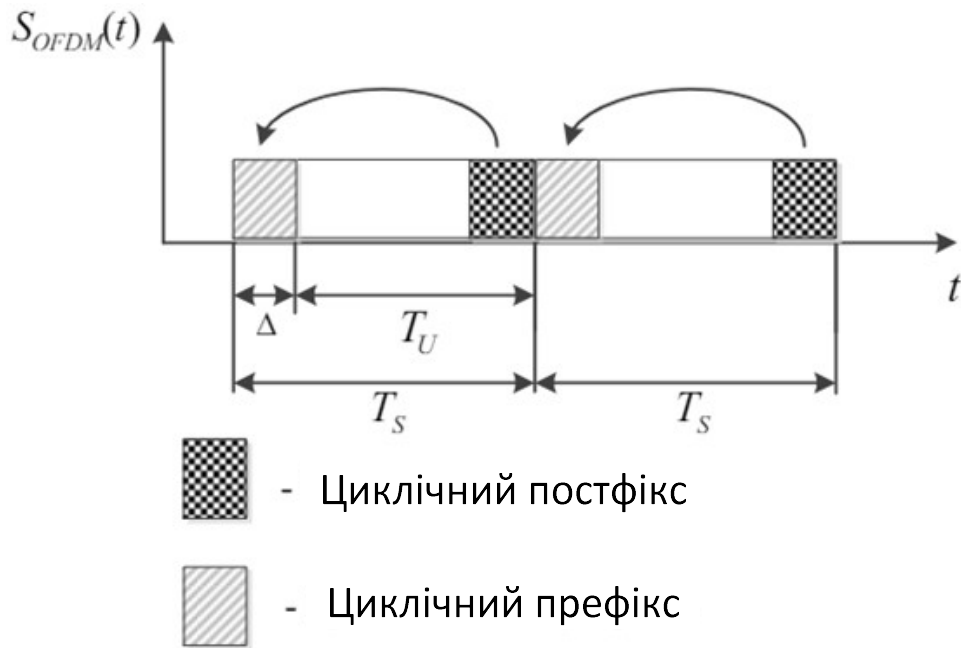


Рисунок 1.3 – Формування циклічного префіксу

Переваги технології OFDM:

1. Нечутливість до розсіювання сигналу в каналі та слабка міжсимвольна інтерференція.
2. Відсутність інтерференції між комірками мережі.
3. Гнучке використання частотного спектру.
4. Ефективне використання спектру завдяки ортогональності підносійних.
5. Оптимальна швидкість передачі даних для всіх абонентів стільника (для передачі обирається оптимальна підносійна з низьким замиранням сигналу).

Хоча технологія OFDM має безсумнівні переваги, вона також має свої недоліки. По-перше, вона дуже чутлива до коливань частоти, що можуть виникнути через дефекти в схемі або ефект Доплера, особливо якщо пристрій пересувається. По-друге, високий відносний піковий рівень потужності до середнього значення (піковий фактор), який зумовлений непослідовним додаванням підносійних, розширює спектр сигналу і, відповідно, спричиняє інтерференцію в каналі [8].

У вихідному каналі використовується SC-FDMA, що є формою множинного доступу з частотним розділенням (Single Carrier Frequency Division Multiple Access), щоб знизити співвідношення максимальної та середньої потужності. Це покращує покриття та продуктивність комірки [9].

The following graphs show how a sequence of eight QPSK symbols is represented in frequency and time

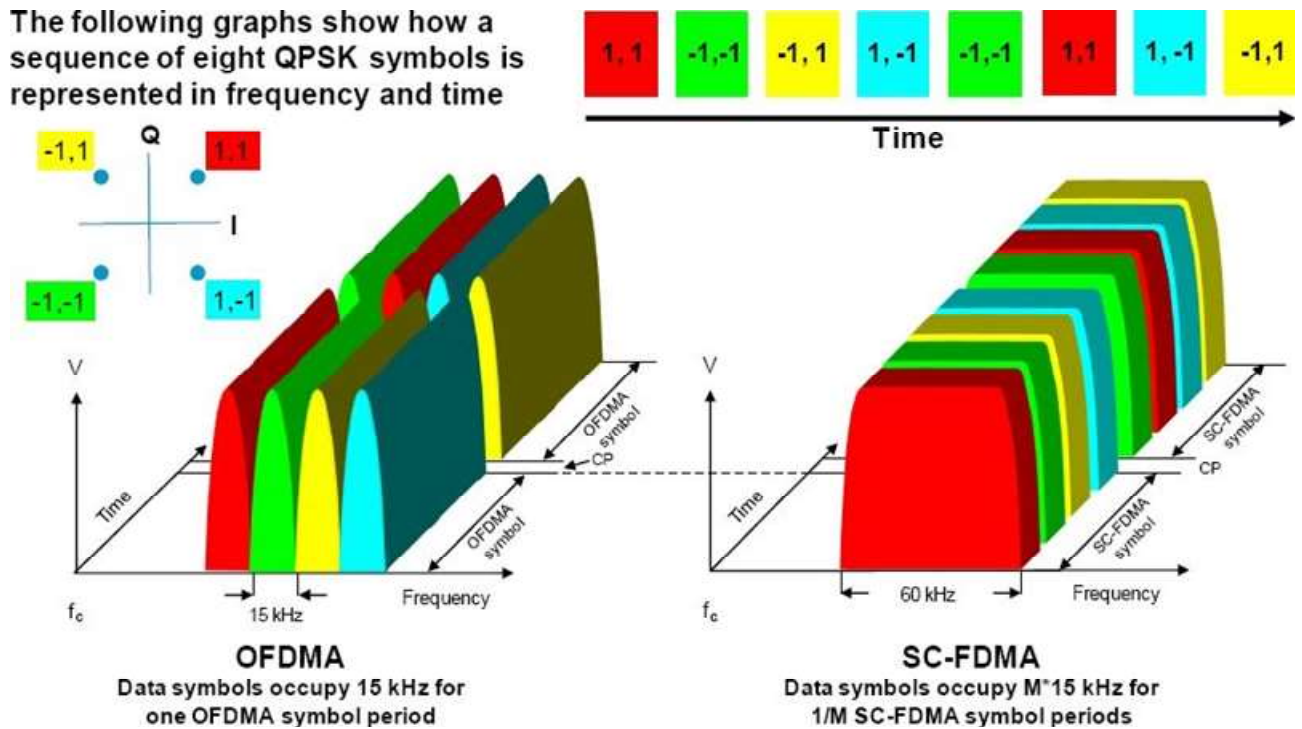


Рисунок 1.4 – Відмінності OFDMA від SC-OFDMA

Технологія SC-OFDMA, реалізована в LTE, використовує дискретне перетворення Фур'є, яке часто розглядається як розширення SC-FDMA у частотній області. Дискретне перетворення Фур'є використовується для мультиплексування зворотних передач у відповідні частотні блоки, на які розбивається ширина смуги. Вибір конкретної носійної полоси залежить від необхідної швидкості передачі. Дані залишаються послідовними і не розділяються, як у вихідному каналі. Сигнал SC-FDMA має певні переваги порівняно з OFDM.

1.2.2 Параметри фізичного рівня стандарту LTE

В часовому вимірі всі інтервали виражаються через базовий інтервал $T_S = 1/30720000$. Тривалість пакета становить 10 мс ($T_{\text{frame}} = 307\,200\,T_S$). Кожен пакет розділяється на 10 однакових підкадрів (субкадрів) довжиною 1 мс ($T_{\text{subframe}} = 30720\,T_S$). В свою чергу, кожен субкадр складається з двох слотів по 0,5 мс ($T_{\text{slot}} = 15360\,T_S$), які містять 7 або 6 символів OFDM залежно від типу циклічного префікса (звичайного або розширеного) [9].

У цьому контексті підтримуються дві структури кадрів: одна для випадку частотного дуплексу (Frequency Division Duplex, FDD), інша – для часового дуплексу (Time Division Duplex, TDD). Спочатку розглянемо кадр для випадку FDD. Кожен кадр складається з 20 слотів довжиною $T_{\text{slot}} = 15360 \times T_S = 0,5$ мс, які нумеруються від 0 до 19. Крім цього, вводиться поняття підкадра (subframe), який складається з двох сусідніх слотів, тобто підкадр з номером i включає слоти з номерами $2i$ і $2i+1$. У випадку FDD низхідний (downlink) та висхідний (uplink) канали передаються на різних частотах, тому в кожному інтервалі часу тривалістю 10 мс є 10 підкадрів для передачі «вниз» і 10 підкадрів для передачі «вгору». Структура кадру для випадку FDD показана на рис. 1.5.

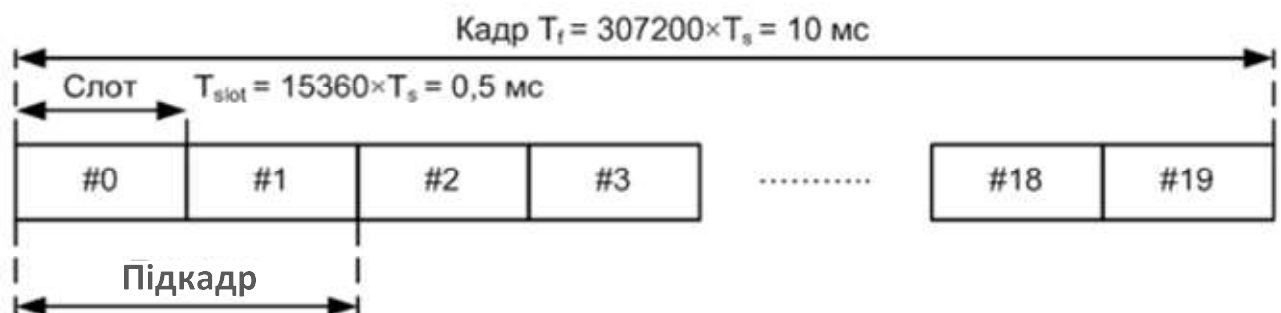


Рисунок 1.5 – Структура кадру для FDD

У випадку TDD кадр складається також з 10 підкадрів тривалістю 1 мс. Проте, у контрасті до FDD, в TDD в окремих підкадрах відбувається передача «вниз», а в інших – «вгору». Крім того, введені спеціальні підкадри, які мають трьохчастинну структуру: DwPTS (Downlink Pilot Time Slot) - слоти передачі «вниз», GP (Guard Period) - захисний інтервал, та UpPTS (Uplink Pilot Time Slot) – слоти передачі «вгору» [11].

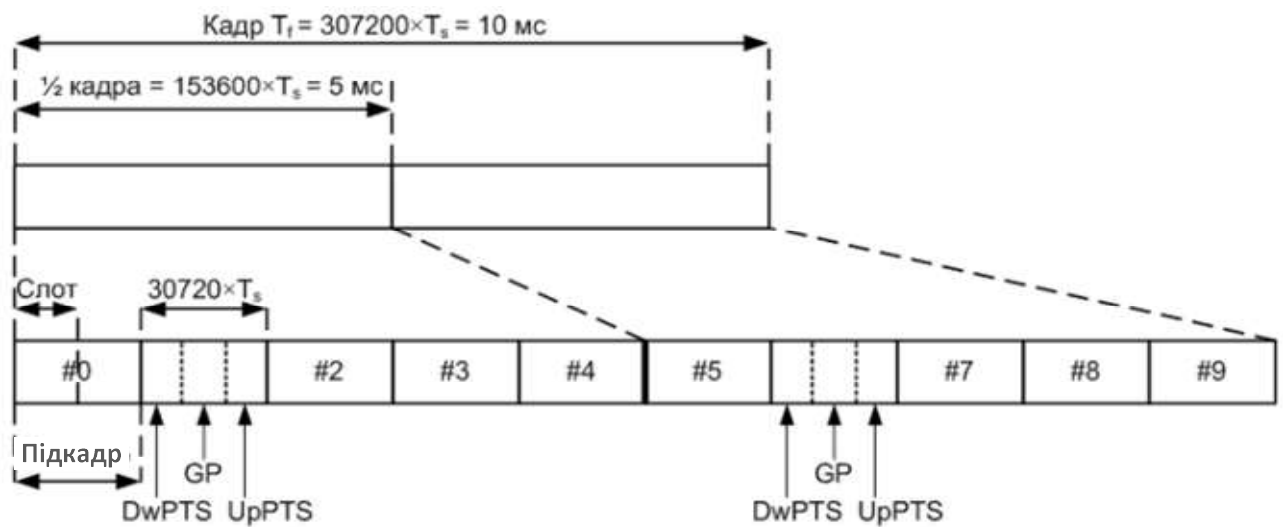


Рисунок 1.6 – Структура кадру для TDD

Підтримуються дві альтернативи для періодичності перемикавання: з інтервалами 5 мс та 10 мс. При періодичності 10 мс, спеціальний підкадр зустрічається лише у першій половині кадру. Під час перемикавання з інтервалом 5 мс, спеціальний підкадр присутній в обох половинах кадру. Цей сценарій показано на рис. 1.6.

Корисна тривалість OFDM-символу $T_U = 2048 T_s$, що приблизно 66,7 мкс. У нормальному режимі перший символ має циклічний префікс $T_{CP} = 160 T_s$ (приблизно 5,2 мкс), а інші символи – $T_{CP} = 144 T_s$ (приблизно 4,7 мкс). У розширеному режимі циклічний префікс $T_{CPe} = 512 T_s$ (приблизно 16,7 мкс). Циклічний префікс триваліший за звичайну затримку поширення каналу [11].

Стандартний циклічний префікс використовується в міських мережах та високошвидкісних додатках, зменшуючи пропускну здатність каналу на 75%. Розширений префікс застосовується у спеціальних випадках, таких як масові передачі на багато осередків у великих мережах. Збільшення інтервалу між підносійними f може зменшити навантаження, яке створюють префікси, збільшуючи тривалість символу T_U . Але це також підвищує чутливість OFDM-сигналу до змін частоти [12].

Кількість підносійних N може варіюватися від 128 до 2048, залежно від ширини каналу. Зазвичай для каналів ширини 5 і 10 МГц використовуються 512 або 1024 підносійні відповідно. Відстань між підносійними $\Delta f = 1/T_U = 15$ кГц, а частота вибірки $f_s = \Delta f_N = 15000N$.

Таблиця 1.1 – Параметри низхідного фізичного рівня LTE

Ширина каналу, МГц	1,25	2,5	5	10	15	20
Тривалість кадру, мс	10					
Довжина субкадру, мс	1					
Відстань між підносійними, кГц	15					
Частота вибірки, МГц	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72
Розмір ШПФ	128	256	512	1024	1536	2048
Кількість підносійних (враховуючи постійний сигнал)	76	151	301	601	901	1201
Захисні підносійні	52	105	211	423	635	847
Кількість ресурсних блоків	6	12	25	50	75	100
Ширина каналу, МГц	1,140	2,265	4,515	9,015	13,51	18,02
Ефективність використання смуги, %	77	90				
OFDM символи/субкадр	7/6 (короткий/довгий префікс)					
Довжина короткого префікса, мкс	5,2 (перший символ) / 4,69 (решта шість)					
Довжина довгого префікса, мкс	16,67					

Базовий інтервал відповідає частоті 30,72 МГц, яка є кратною стандартній частоті обробки 3,84 МГц, що використовується у системах широкосмугового множинного доступу з кодовим поділом (WCDMA). Це зроблено спеціально для того, щоб пристрої, що працюють у стандартах 3G та LTE, мали спільну синхронізацію. У табл. 1.1 приведені основні параметри фізичного рівня для LTE у режимі FDD [12].

Передача в висхідному напрямку аналогічна передачі в низхідному. Найдрібнішою одиницею ресурсної сітки є RE, що містить 12 RE в одному блоку даних SC-FDMA. У режимі FDD абонентському пристрою призначаються кілька послідовних РБ у висхідному каналі, а в низхідному каналі використовується непослідовне призначення.

У часовій області висхідний пакет розділяється на 10 субкадрів по 1 мс кожен і на 20 слотів. Слот складається з 7 або 6 символів SC-FDMA в залежності від типу префікса. Тривалість циклічних префіксів у висхідному каналі ідентична тій, що в низхідному.

1.2.3 Опорні сигнали та синхронізація в LTE

У LTE, на відміну від пакетних мереж, не має фізичної преамбули для синхронізації та оцінки усунення носійної. Замість цього, до кожного РБ додаються опорні та синхронізуючі сигнали. Призначення опорного сигналу полягає у визначенні умов у каналі передачі.

Під час низхідної передачі опорні символи вставляються в перший і третій OFDM-символ від кінця в кожному слоті на частотах, що розташовані на відстані шести підносійних. На кожен РБ припадає по 4 опорних символи.

У висхідному каналі існують два типи опорних сигналів: демодульовані (Demodulation Reference Signals, DM-RS) і зонduючі (Sounding Reference Signal, SRS). Демодульовані опорні сигнали функціонують аналогічно до опорних сигналів у низхідному каналі.

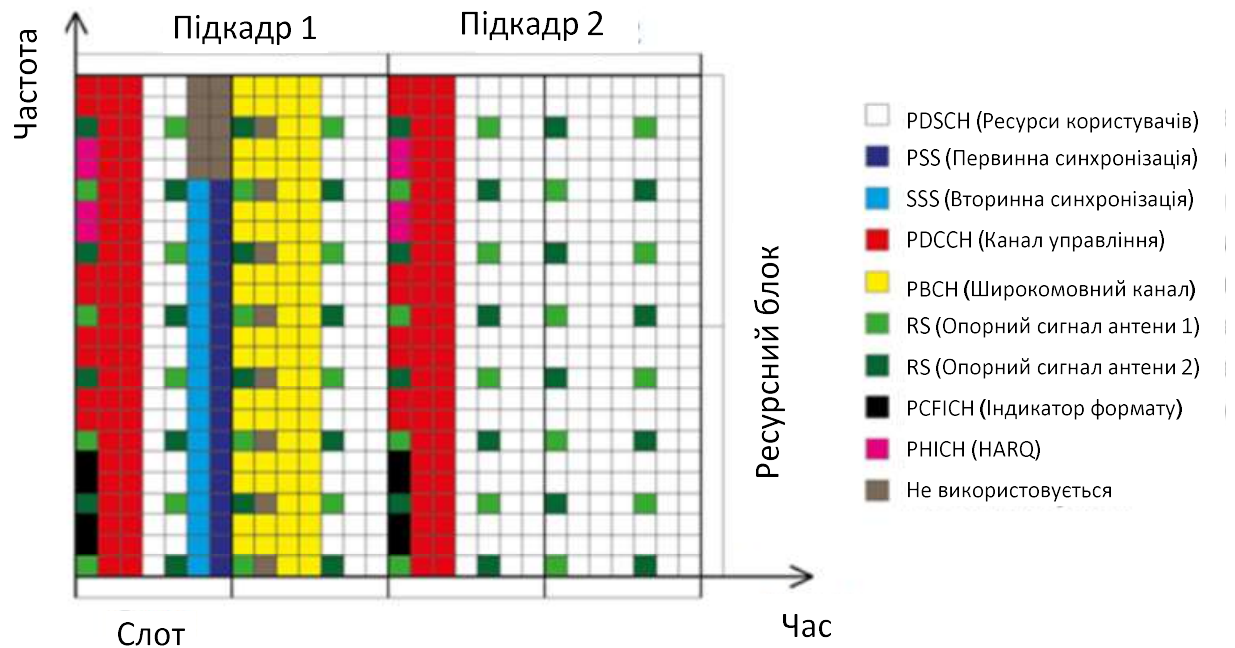


Рисунок 1.7 – Призначення ресурсних елементів

У загальному каналі передачі інформації послідовність демодульованого опорного сигналу передається в четвертому або третьому SC-FDMA символі кожного слоту залежно від типу префікса. Зондові сигнали використовуються для оцінки якості каналу. SRS є опорним сигналом із ширшою смугою, який, як правило, передається в останньому SC-FDMA символі субкадру. У цьому блоку не передаються дані користувача, що знижує пропускну здатність висхідного каналу на 7%. Сигнал SRS може бути використаний за необхідності [14].

1.2.4 Типи каналів в стандарті 4G LTE

Стандарт LTE визначає ряд низхідних фізичних каналів для передачі інформаційних блоків, які надходять від рівнів керування доступом до мережі (MAC) та вище. Ці канали розділяються на транспортні та канали управління.

Транспортні канали включають:

1. Фізичний широкомовний канал (Physical Broadcast Channel, PBCH), який використовується для передачі широкомовного набору параметрів,

необхідних для першочергового доступу до комірки, включаючи ширину низхідного каналу, структуру каналу PHICH (Physical Hybrid Automatic Repeat Request Indicator Channel) та 8 старших бітів номера кадру. Ці параметри складають головний інформаційний блок (Master Information Block, MIB) завдовжки 14 біт. Канал PBCH доступний на всій зоні покриття, включаючи межі комірки. Для виявлення сигналу PBCH абонентському пристрою не потрібно знати ширину смуги пропускання. Дані MIB кодуються з дуже низькою швидкістю та займають 72 центральні підносійні (6 RB). Канал PBCH займає 4 субкадри по 10 нс [11].

2. Загальний канал (Physical Downlink Shared Channel, PDSCH), який призначений для передачі даних користувачеві. Для зменшення ймовірності помилок застосовується пряма корекція помилок. Сигнали даних розділяються у просторі відповідно до типу приймальних антен і модулюються QPSK, 16 QAM або 64 QAM. Канал PDSCH може використовуватися для широкомовної трансляції даних, які не передаються через широкомовні канали PBCH. До таких даних можуть належати, наприклад, системні інформаційні блоки (System Information Blocks, SIB) та повідомлення системи персонального виклику.

3. Канал групової передачі (Physical Multicast Channel, PMCH) встановлює структуру фізичного рівня для послуг Multimedia Broadcast і Multicast (MBMS). У першій редакції стандарту LTE ці послуги не були включені. Сигнал PMCH призначений для мереж із однією частотою [12].

У перших 1, 2 або 3 символах OFDM розташовані канали управління:

1. Канал фізичного керування (Physical Downlink Control Channel, PDCCH) використовується для передачі таблиць, що призначають каналні ресурси абонентським пристроям. У одному субкадрі може міститися кілька PDCCH. Сигнал модулюється QPSK.

2. Канал індикатора формату керування (Physical Control Format Indicator Channel, PCFICH) є індикатором формату (Control Frame Indicator, CFI) в кожному субкадрі, який передає номери OFDM-символів для трансляції

повідомлень каналу керування PDCCH. Індикатор CFI містить 32 біти і розташований у 16 RE першого OFDM-символу нисходящого кадру. Сигнал модулюється QPSK.

3. Канал індикатора гібридної автоматичної повторної передачі (Physical Hybrid Automatic Repeat Request Indicator Channel, PHICH) використовується для підтвердження доставки даних у висхідному каналі (HARQ ACK/NACK). Для забезпечення надійності передачі сигнал повторюється тричі. Сигнал модулюється BPSK.

На фізичному рівні у висхідному напрямку існують три типи каналів: загальний (PUSCH), керування (PUCCH) і випадкового доступу (PRACH). Загальний канал використовується для передачі даних користувача, модулюється QPSK або 16 QAM. У частотній області передача здійснюється за допомогою ресурсних блоків 180 кГц, з перестроюванням частоти всередині другого слоту.

Канал керування призначений для передачі індикаторів якості каналу, підтвердження доставки, запиту на розклад ресурсів та зворотного зв'язку. Він передається незалежно від трафіку даних, використовуючи один ресурсний блок у кожному слоті. Канал випадкового доступу використовується для запиту початкової ініціалізації в мережі і займає 72 підносійні [13].

1.3 Структура та характеристики моделі сигналу LTE

Описана імітаційна модель, розроблена в середовищі MATLAB/Simulink та призначена для генерації сигналу стандарту LTE. На виході імітаційної моделі спостерігаються сигнали з номіналами ширини спектра, префіксами і видами модуляції, що відповідають сигналу стандарту LTE. Модель призначена для формування тестових сигналів стандарту LTE для подальшої апробації та відладки розроблюваних методів розпізнавання та аналізу радіосигналу стандарту LTE.

Загальна схема генерації сигналу стандарту LTE наведена на рисунку 1.8.

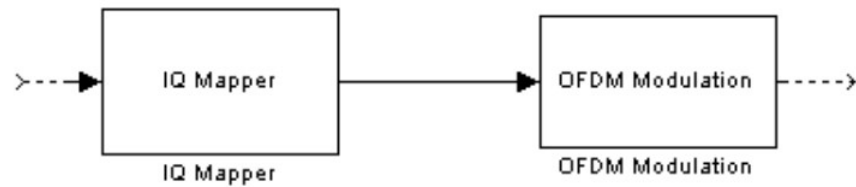


Рисунок 1.8 – Блок схема алгоритму генерації стандарту LTE

Сигнал генерується шляхом застосування модуляції ФМ/КАМ у блоках «IQ Mapper» та обробки ОБПФ у блоках «OFDM Modulation». Розглянемо докладніше структуру цих блоків: блоку «IQ Mapper» (рисунок 1.9) і блоку «OFDM Modulation» (рисунок 1.10).

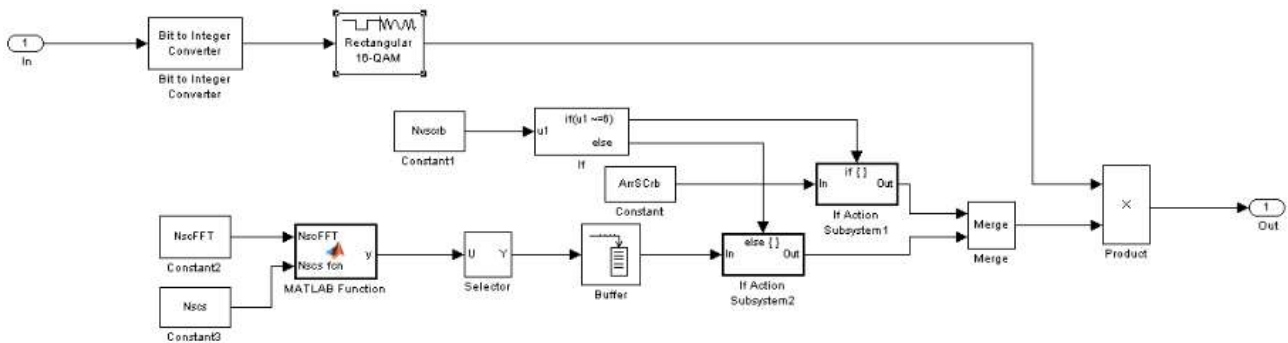


Рисунок 1.9 – Схема алгоритму формування сигналу стандарту LTE

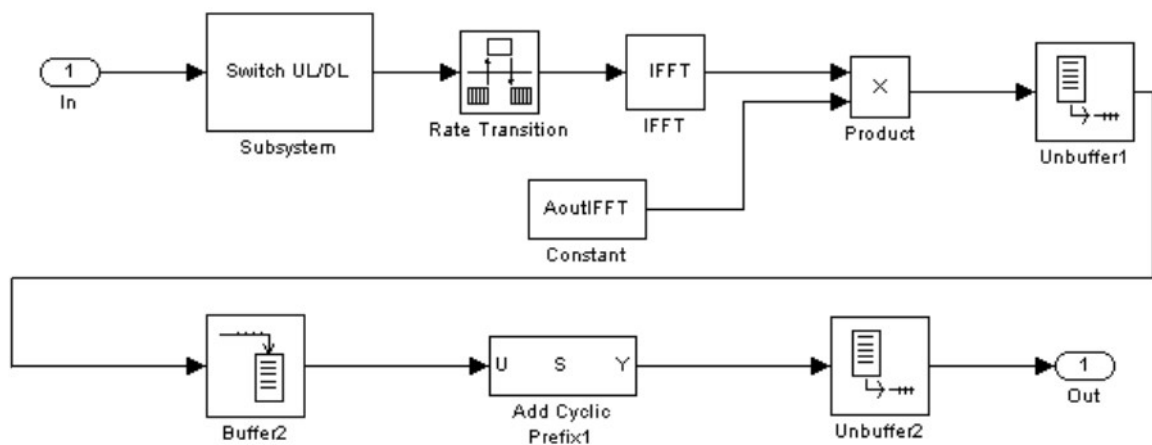


Рисунок 1.10 – Схема алгоритму створення сигналу стандарту LTE

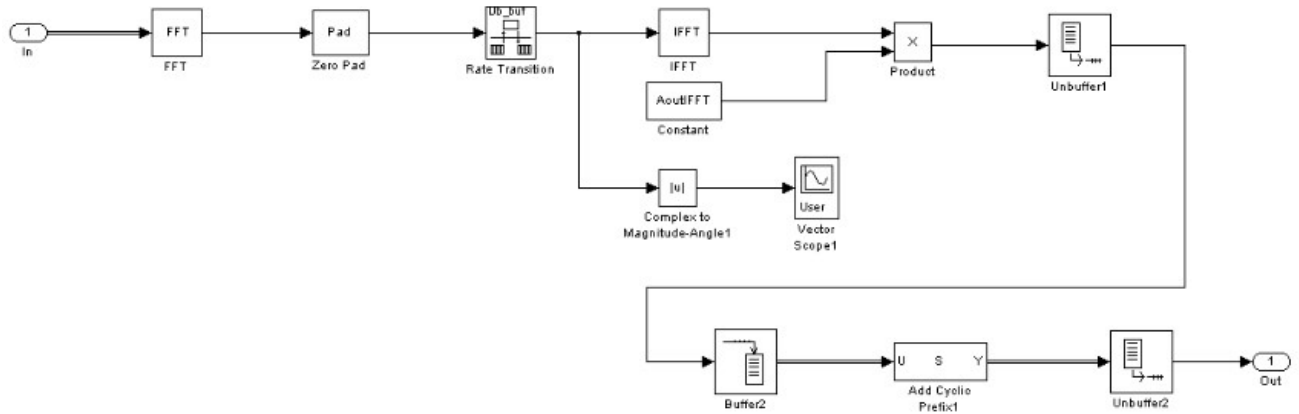


Рисунок 1.12 – Структура блоку «OFDM Modulation»

Перевірка характеристик моделі, щодо відповідності вимогам стандарту LTE, проводилась у відповідності до схем блоків, зображених на рис. 1.11 - 1.12.

На рис. 1.13 представлені сигнальні сузір'я на підносійних сигналів LTE для типів модуляції: ФМ-4, QAM-64.

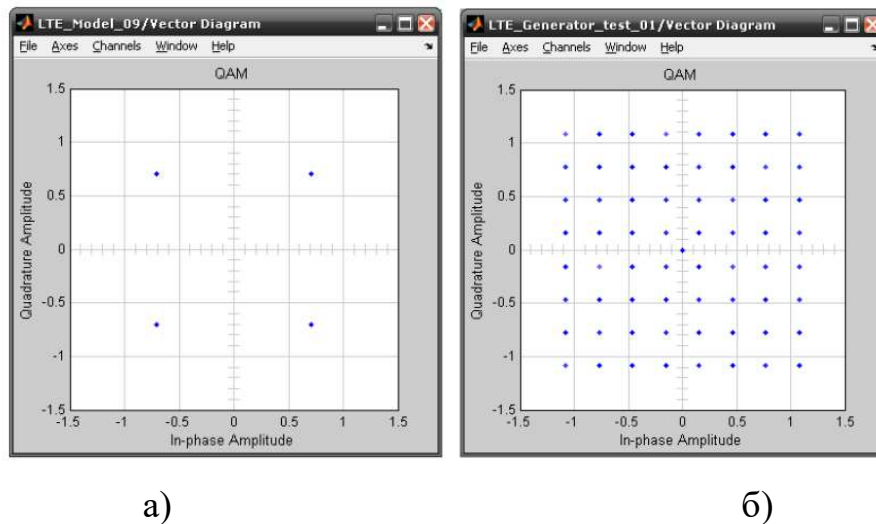
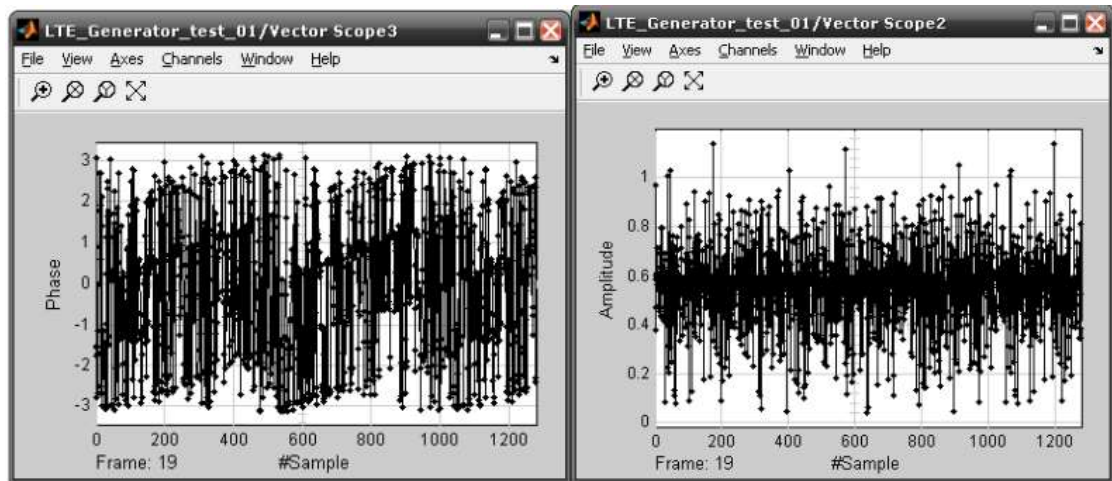


Рисунок 1.13 - Сигнальні сузір'я на виході блоків IQ Mapper
ФМ-4 (а), QAM-64 (б)

Рисунок 1.14 демонструє фазу (а) і амплітуду (б) сигналу LTE на виході імітаційної моделі.

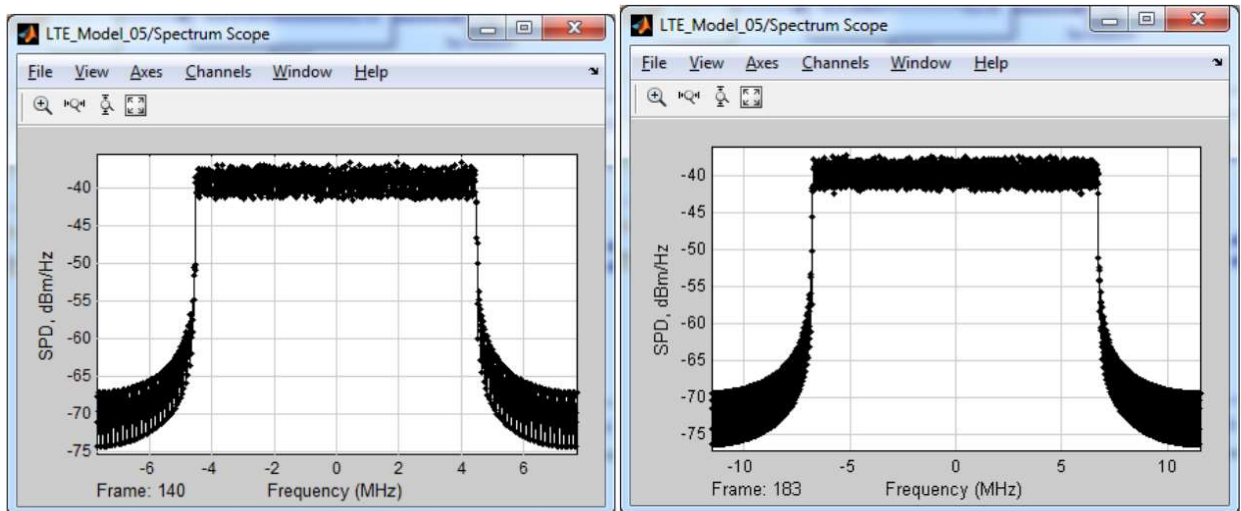


(a)

(б)

Рисунок 1.14 – Фаза (а) та амплітуда (б) сигналу на виході моделі

Спектри сигналів для смуг частот 10 та 15 МГц наведені на рис. 1.15.



a)

б)

Рисунок 1.15 – Спектр сигналу LTE зі смугою частот 10 МГц (а),
та 15 МГц (б)

На рис. 1.16 та 1.17 показані зміни спектральних характеристик з часом.

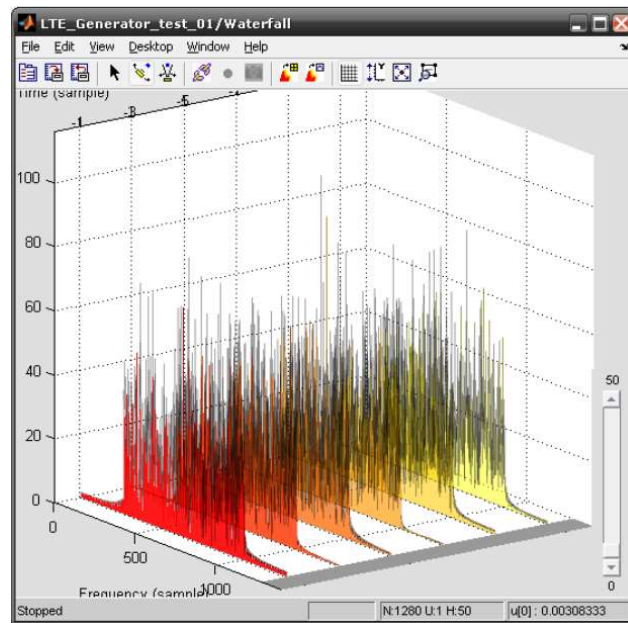


Рисунок 1.16 – Зміни спектру сигналу LTE з часом, з шириною смуги 10 МГц

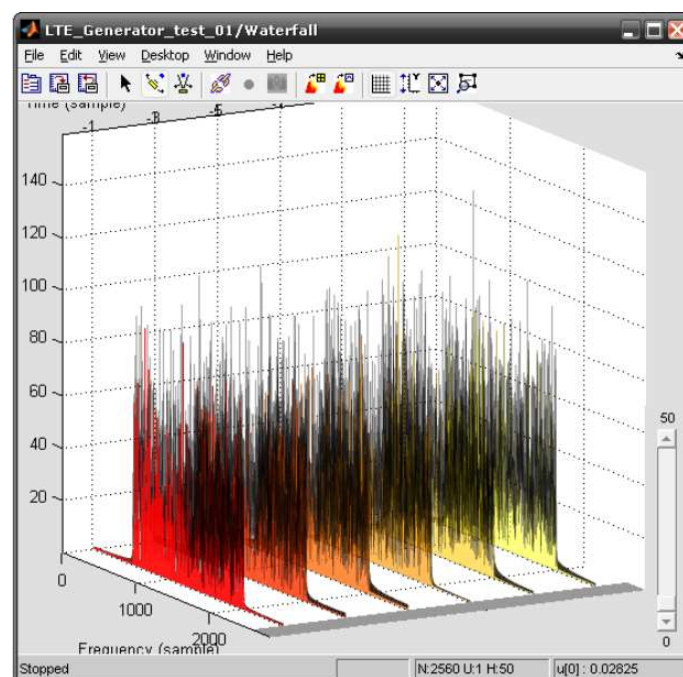


Рисунок 1.17 – Зміни спектру сигналу LTE з часом, з шириною смуги 15 МГц

Результати аналізу показують, що параметри сигналу, що виробляється імітаційною моделлю, відповідають вимогам стандарту LTE. Це включає в себе різноманітні характеристики, такі як спектральна чистота, часова

стабільність, амплітуда та фазові властивості сигналу. Таким чином, можна впевнено використовувати цю модель для випробувань нових алгоритмів обробки сигналу, а також для вдосконалення методів ідентифікації та оцінки параметрів LTE сигналів.

1.4 Висновки до розділу

Проаналізовано основні особливості стандарту LTE, вивчено фізичний рівень стандарту LTE, детально розглянуті технології OFDM та SC-OFDM, можливі конфігурації з точки зору ширини смуги сигналу, вивчена структура кадрів для випадку частотного та часового дуплексу, структура слотів, принцип формування циклічного префіксу, досліджені основні фізичні канали для низхідного та висхідного напрямків, канали управління, сигнали синхронізації, тощо.

Розроблено імітаційну модель фізичного рівня стандарту LTE в середовищі MATLAB/Simulink, наведені структурні схеми з описом призначення блоків, а також опис можливостей моделі. Проведено успішну верифікацію моделі. Встановлено, що розроблена модель дійсно є моделлю стандарту LTE за повним збігом характеристик (значення підтримуваних смуг сигналу, форма спектра, підтримка OFDM для низхідного та SC-OFDM для висхідного напрямку, тривалості OFDM символів і символів на піднесених, тривалостей нормального та розширеного циклічного префікса і т.д.).

Розроблена модель може бути застосована для дослідження алгоритмів та методів ідентифікації та оцінки параметрів сигналу стандарту LTE.

2 ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛУ СТАНДАРТУ LTE

2.1 Визначення ширини смуги LTE сигналу

Точне визначення ширини смуги сигналу є ключовим не лише для радіомоніторингу. Наприклад, у системах когнітивного радіо воно може використовуватись для визначення параметрів прийнятого сигналу LTE, що дозволить правильно демодулювати його. Згідно з рекомендацією Міжнародного союзу з електрозв'язку (МСЕ), для вимірювання ширини смуги частот може застосовуватись метод вимірювання за рівнем α дБ [11].

Цей підхід широко використовується на практиці і показує високу ефективність у широкому діапазоні відношень сигнал/шум (С/Ш), при наявності в каналі адитивного білого гаусівського шуму (АБГШ). С/Ш - це відношення середньої потужності сигналу до середньої потужності шуму. Однак при впливі спотворень (якщо не використовувати еквалайзер) точність оцінки ширини смуги сигналу знижується. Також розроблено методи оцінки ширини смуги сигналів OFDM на основі вейвлет-перетворення, які дають високу точність при великих значеннях С/Ш, але при низьких С/Ш точність також знижується. У цьому розділі розглядається метод оцінки ширини смуги сигналу стандарту LTE, який є стійким до спотворень і дозволяє досягти високої точності навіть при низьких значеннях С/Ш [13].

На цьому методі ґрунтується розрахунок кореляційної кривої на основі циклічного префіксу для 6 можливих варіантів смуг, після чого задача полягає в аналізі отриманих результатів. Точність цього методу безпосередньо залежить від методики аналізу кореляційних кривих.

Для розрахунку кореляційної кривої можна скористатися математичним описом, (варто відзначити, що ця сама операція використовується, наприклад, для грубої символної синхронізації):

$$C[k] = \sum_{n=0}^9 \frac{2 \sum_{r=0}^{r_{\max}} z[k_{\max} n + k + r] z^*[k_{\max} n + k + r + N_{\text{ifft}}]}{\sum_{r=0}^{r_{\max}} z[k_{\max} n + k + r]^2 + \sum_{r=0}^{r_{\max}} z[k_{\max} n + k + r + N_{\text{ifft}}]^2} \quad (2.1)$$

де $n=0, \dots, 9$ – номер слоту, що рахується, $r = 0, \dots, r_{\max}$ – номер відліку циклічного префіксу, k – номер відліку у слоті, $k=0, \dots, k_{\max}$, N_{ifft} – кількість відліків ОШПФ.

У випадку, коли параметри $r_{\max}$, $k_{\max}$ та N_{ifft} вибрані правильно для поточного значення зайнятої смуги сигналу, кореляційна крива матиме 7 або 6 чітко виражених локальних максимумів для випадку нормального або розширеного циклічного префікса відповідно (рис. 2.1) [14].

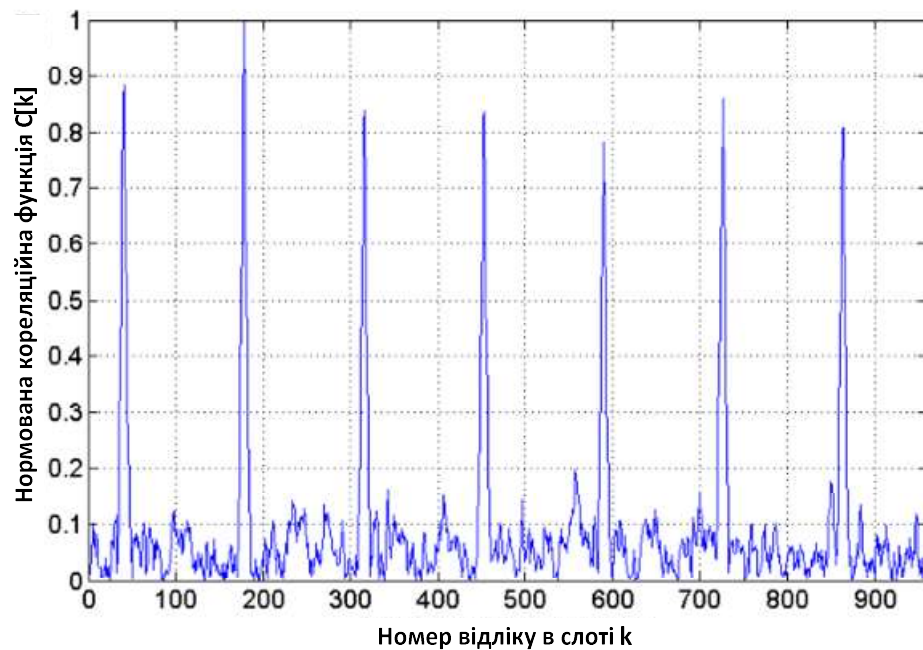


Рисунок 2.1 – Залежність нормованої кореляційної функції $C[k]$ від номера відліку у слоті k для нормального циклічного префікса при зайнятій смузі шириною 1.4 МГц, $r_{\max} = 9$, $k_{\max} = 959$, $N_{\text{ifft}} = 128$

Кількість локальних максимумів зумовлена кількістю символів OFDM у слоті і відповідає моментам початку символів OFDM. У випадку, коли

параметри r_{max} , k_{max} та N_{ifft} вибрані неправильно для поточного значення зайнятої смуги сигналу, кореляційна крива матиме шумоподібний вигляд (рис. 2.2). Залежності на рисунках 2.1 - 2.2 отримані при значенні С/Ш 5 дБ.

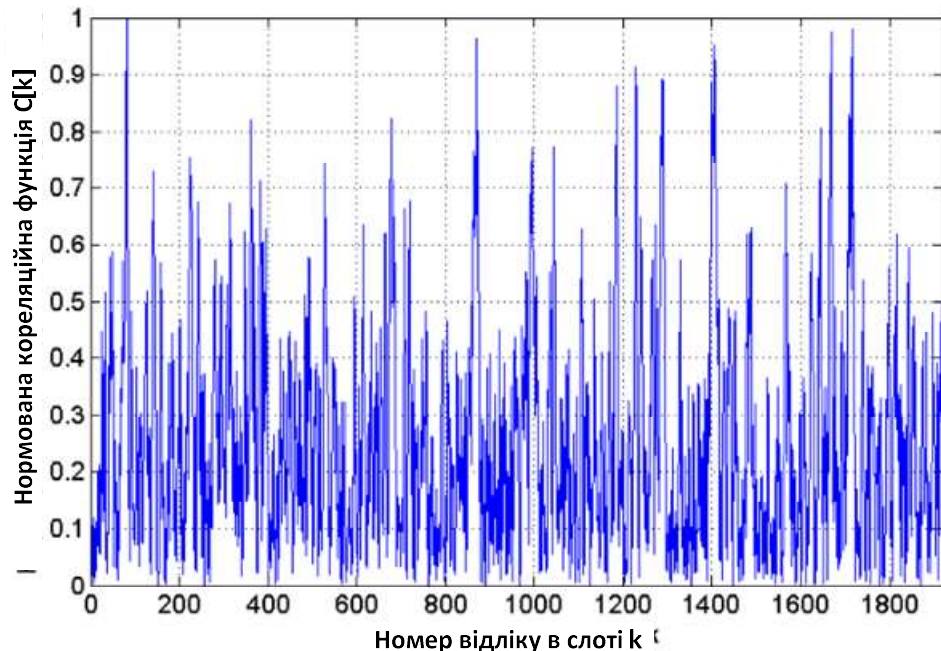


Рисунок 2.2 – Залежність нормованої кореляційної функції $C[k]$ від номера відліку у слоті k для нормального циклічного префікса при зайнятій смузі шириною 1.4 МГц, $r_{max} = 19$, $k_{max} = 1919$, $N_{ifft} = 256$

Описана властивість кореляційної функції циклічного префіксу лежить в основі запропонованого методу, який полягає у розрахунку нормованої кореляційної функції $C[k]$ для всіх можливих наборів параметрів r_{max} , k_{max} та N_{ifft} та подальшому аналізу отриманих кривих.

Імітаційне моделювання відбувалося у середовищі MATLAB/Simulink на розробленій моделі стандарту LTE для каналу зі замираннями, використовуючи профілі затримки Extended Pedestrian A (EPA), Extended Vehicular A (EVA) і Extended Typical Urban (ETU) з максимальною частотою Доплера відповідно 5, 70 і 300 Гц. Ці профілі відображають низький, середній і високий рівні розкиду затримки в середовищі.

Характеристики каналів наведено у табл. 2.1-2.3.

Таблиця 2.1 – Профіль затримки, ЕРА

Затримка, нс	Потужність, дБ
0	0
30	-1
70	-2
90	-3
110	-8
190	-17,2
410	-20,8

Таблиця 2.2 – Профіль затримки, EVA

Затримка, нс	Потужність, дБ
0	0
30	-1,5
150	-1,4
310	-3,6
370	-0,6
710	-9,1
1090	-7
1730	-12
2510	-16,9

Параметри моделі включали: напрям передачі - downlink, тип модуляції ФМ-4, розмір циклічного префікса – нормальний. Результати імітаційного моделювання довели, що в умовах впливу лише АБГШ запропонований метод та метод оцінки за рівнем x дБ (значення x розглядалися 3 і 5 дБ) забезпечують точність вимірювання смуги не менше 99% в діапазоні відношення сигнал/шум від -3 до 30 дБ [15].

Таблиця 2.3 – Профіль затримки, ETU

Затримка, нс	Потужність, дБ
0	-1
50	-1
120	-1
200	0
230	0
500	0
1600	-3
2300	-5
5000	-8

Усі наведені параметри отримані шляхом усереднення за 50 000 вимірами, що, округлюючи до найближчого цілого, відповідає кількості слотів від 4 при ширині смуги 20 МГц до 52 при ширині смуги 1.4 МГц.

Результати моделювання для 1,4 МГц смуги каналів EРА, EVA та ETU показані на рисунках 2.3 - 2.5 відповідно.

На графіках синя лінія відображає запропонований метод (ПМ), зелена - метод оцінки на рівні 3 дБ, червона - метод оцінки на рівні 5 дБ. Отримані залежності (рисунки 2.3 – 2.8) в цілому відповідають результатам, представленим в роботах інших дослідників.

З результатів моделювання випливає, що запропонований метод, так само як і при використанні АБГШ, забезпечує правильне вимірювання смуги не менше 99% у діапазоні відношення сигнал/шум від 0 до 30 дБ.

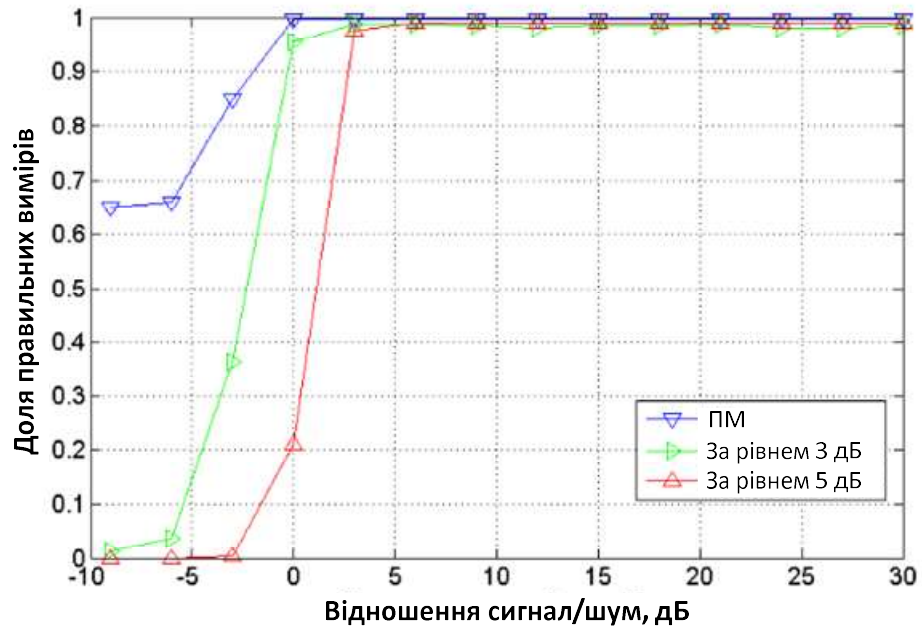


Рисунок 2.3 – Залежність частки правильних вимірів смуги від відношення С/Ш для смуги 1,4 МГц, модель каналу ЕРА

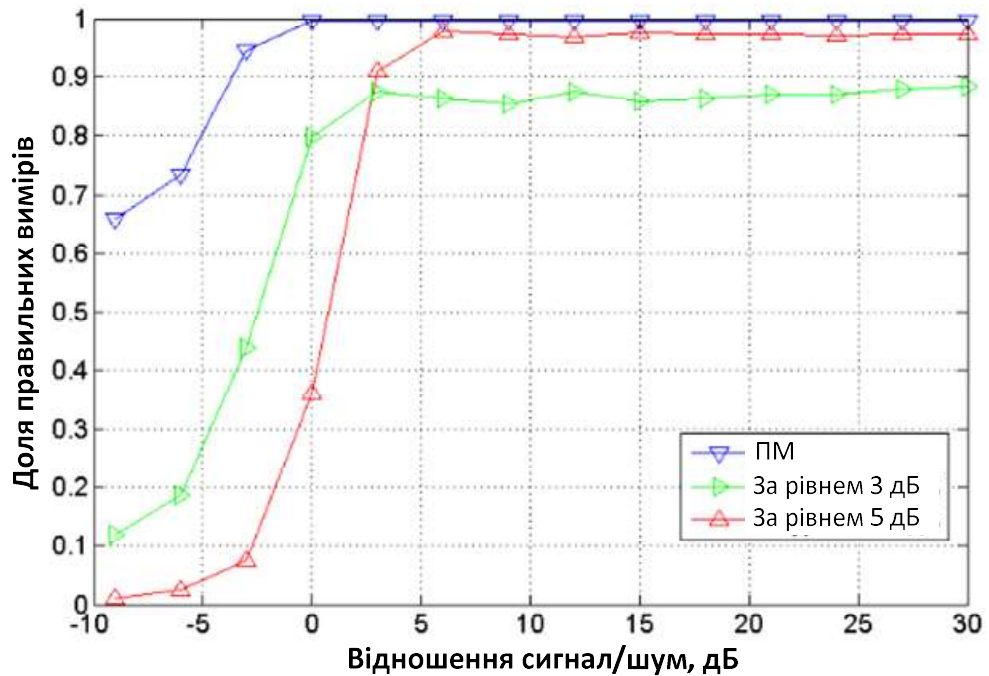


Рисунок 2.4 – Залежність частки правильних вимірів смуги від відношення С/Ш для смуги 1,4 МГц, модель каналу EVA

Метод оцінки за рівнем x дБ найкраще працює при $x=5$ дБ, коли відношення сигнал/шум перевищує 5 дБ. При меншому відношенні сигнал/шум, особливо при $x=3$ дБ, цей метод показує кращі результати.

Збитки методів за рівнем x дБ порівняно з запропонованим не перевищують 0,5 при $x=5$ дБ і 0,15 при $x=3$ дБ при відношенні сигнал/шум понад 5 дБ [14]. Проте, при меншому відношенні сигнал/шум збитки значно зростають. Наприклад, при відношенні сигнал/шум - 9 дБ, запропонований метод забезпечує правильне вимірювання не менше ніж у 65% випадків для всіх моделей каналу, у той час як методи за рівнем x дБ дають лише до 0,12.

При -9 дБ ймовірність вірного визначення смуги становить не менше 65%. У дослідженні [15], автори говорять про 100% точності методу при 3 дБ, тоді як запропонований метод дає подібний результат навіть при 0 дБ. Метод на основі вейвлет-перетворення, який описаний в [16], при відношенні сигнал/шум -5 дБ має помилку оцінки не менше 45% при використанні вейвлета Хаара і рівній декомпозиції 6. Запропонований метод забезпечує помилку оцінки до 30%, 20% і 20% для каналів EPR, EVA і ETU, відповідно.

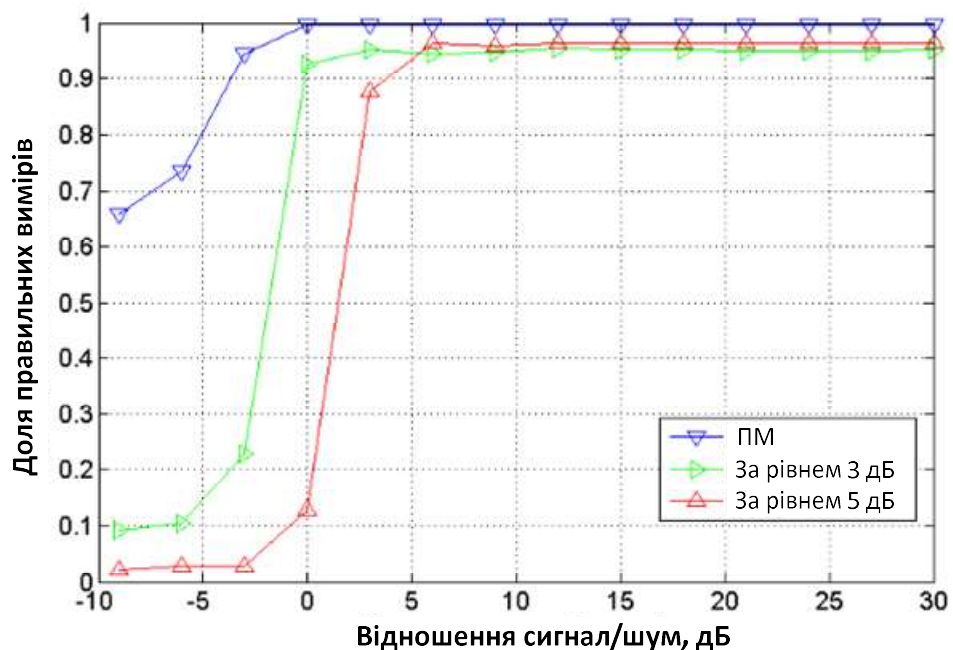


Рисунок 2.5 – Залежність частки правильних вимірів смуги від відношення С/Ш для смуги 1,4 МГц, модель каналу ETU

Результати моделювання показали, що зі збільшенням ширини смуги сигналу частка правильних вимірювань смуги за методом за рівнем α дБ зменшується.

2.2 Ідентифікація сигналу LTE

У цьому дослідженні був розроблений комплексний метод, який ґрунтується на послідовному визначенні параметрів прийнятого сигналу. Спочатку проводиться обчислення ширини смуги сигналу за методом, описаним вище. Якщо отримане значення збігається з одним із можливих варіантів ширини смуги, характерних для стандарту, розпочинається другий етап. На цьому етапі проводиться обчислення тривалості інформаційного символу на підносійних. Проводиться аналіз нормалізованої послідовності вимірів, розраховуються номери вимірів локальних максимумів, що перевищують 0,95. Якщо обидва етапи виявляють характерні для стандарту LTE значення, приймається висновок, що прийманий сигнал – це сигнал стандарту LTE [16].

Результати імітаційного моделювання показують, що для сигналу OFDM точність визначення тривалості інформаційного символу методом в діапазоні відношення сигнал/шум від -10 до 30 дБ залежить від кількості усереднених результатів. При використанні достатньої кількості усереднення метод забезпечує точність оцінки не менше 99% у вказаному діапазоні відношень сигнал/шум (рис. 2.6) [15].

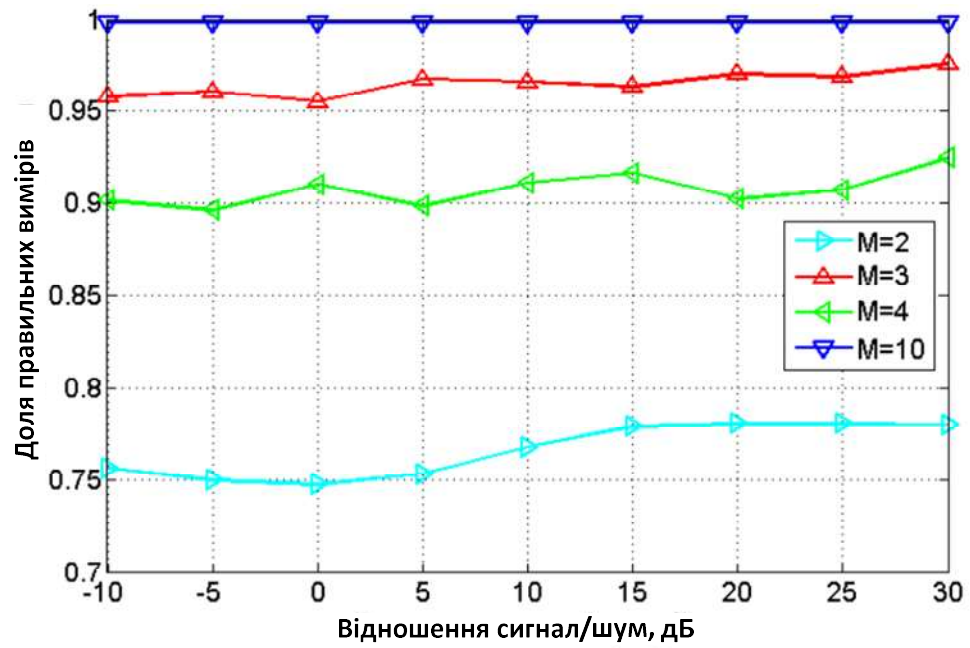


Рисунок 2.6 – Залежність частки правильних вимірів смуги від відношення С/Ш для смуги 1,4 МГц, модель каналу ETU

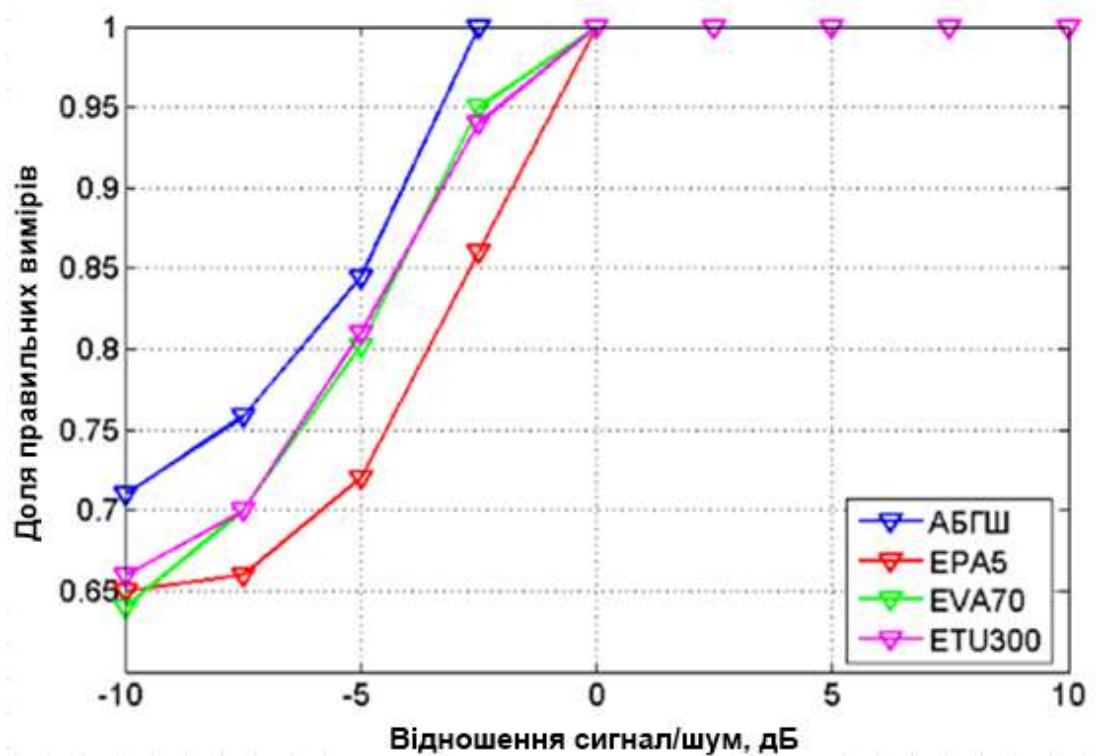


Рисунок 2.7 – Залежність частки правильних вимірів смуги від відношення С/Ш для смуги 1,4 МГц

Отже, точність методу ідентифікації прямо залежить від того, наскільки точно ми можемо визначити ширину смуги сигналу. На рисунку 2.7 показана залежність частки правильних вимірювань ширини смуги сигналу від співвідношення сигнал/шум для каналу з АБГШ та каналів зі замираннями при смузі сигналу 1,4 МГц.

Для сигналу LTE при частоті 1,4 МГц з моделлю каналу ЕРА при діапазоні ОСШ від -3 до 30 дБ частка правильних вимірювань ширини смуги становить не менше 0,85, а для моделей каналів EVA та ETU при тому ж діапазоні ОСШ – не менше 0,94 (при діапазоні ОСШ від -6 до 30 дБ частка не менше 0,8).

2.3 Детектування синхронізаційного сигналу

У мережах LTE для передачі та отримання даних мобільна станція має бути синхронізована з базовою станцією. Для виконання цієї процедури базова станція використовує спеціальні сигнали синхронізації: перший синхросигнал (PSS - Primary Synchronization Signal) та другий синхросигнал (SSS - Secondary Synchronization Signal).

Процес синхронізації включає наступні етапи [17]:

1. Груба часова синхронізація з початком слоту та оцінка дробової частотної відхиленості за допомогою кореляційної кривої циклічного префіксу.
2. Точна часова синхронізація з початком 0-го або 10-го слоту, визначення другої складової ідентифікатора базової станції та цілої частини частотної відхиленості за допомогою кореляційної кривої першого синхросигналу.
3. Точна часова синхронізація з початком кадру, визначення першої складової ідентифікатора базової станції за допомогою кореляційної кривої другого синхросигналу.

Первинний та вторинний синхросигнали у стандарті LTE – це послідовності Задова-Чу (Zadoff-Chu). Первинний синхросигнал формується відповідно до наступного математичного опису [17]:

$$d_u(n) = \begin{cases} e^{\frac{\pi u n(n+1)}{63}} & ; n = 0, 1, \dots, 30 \\ e^{\frac{\pi u (n+1)(n+2)}{63}} & n = 31, 32, \dots, 61 \end{cases}, \quad (2.2)$$

У разі наявності шуму в каналі, сигнал можна представити у вигляді:

$$s(n) = d_u(n) + N(n), \quad (2.3)$$

де $N(n)$ – адитивний білий гаусовий шум.

Кореляція між прийнятою сумішшю сигналу та шуму і зразком синхросигналу обчислюється таким чином [18]:

$$Corr_1 = \sum_{n=0}^{61} d_u(n) S(n+m). \quad (2.3)$$

Далі виконуємо такі перетворення:

$$d_{u_p}(n) = pad(d_u(n)); \quad (2.4)$$

$$S_p(n) = pad(S(n)). \quad (2.5)$$

де pad – це операція заповнення масиву нулями до 64-х відліків.

Це необхідно для виконання операції ШПФ. Оскільки початковий розмір масиву складає 62 відліки, операція pad додає 0 в початок та кінець масиву.

Далі по алгоритму виконується ШПФ [19]:

$$FFT_{du}(n) = \sum_{n=0}^{N-1} d_{up}(n) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}}, k = 0, \dots, N-1; \quad (2.6)$$

$$FFT_{du}(n) = \sum_{n=0}^{N-1} S_p(n) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}}, k = 0, \dots, N-1. \quad (2.7)$$

Після цього вираховується взаємна кореляційна функція результатів ШПФ:

$$Corr_2(m) = depad(|FFT_S(n)|) depad(|FFT_{du}(n+m)|), \quad (2.8)$$

де *depad* – операція видалення значень з масиву, що відповідають розташуванню раніше доданих нулів у результаті операції *pad*.

Результатом є множення двох отриманих взаємнокореляційних функцій:

$$R(m) = |Corr_2(m) Corr_1(m)|. \quad (2.9)$$

На рис. 2.8 представлено залежність ймовірності помилкового визначення максимуму взаємнокореляційної функції P_B від відношення сигнал/шум (SNR) в смузі сигналу при ідеальній роботі системи синхронізації.

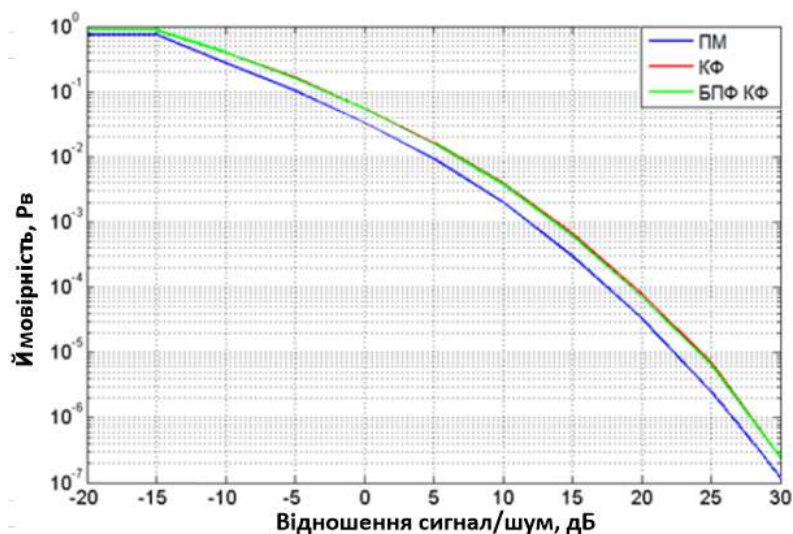


Рисунок 2.8 – Залежність ймовірності помилкового визначення максимуму взаємнокореляційної функції (P_B) від SNR

Зеленою лінією позначена крива для кореляційної функції, обчисленої на основі результатів ШПФ (ШПФ КФ), червоною – для «класичної» кореляційної функції (КФ), а синьою – для запропонованого методу (ПМ). Запропонований метод дозволяє знизити ймовірність помилкового визначення максимуму взаємкореляційної функції порівняно з класичним методом. Наприклад, для моделі каналу ЕРА енергетичний виграш становить 1,9 дБ [18].

Вивчено характер зміни ймовірності P_e від нормованого зміщення частоти за фіксованого значення SNR для розглянутих моделей каналів. Нормування виконано до величини розносу між носійними сигналами $f = 15 \text{ кГц}$. Приклади отриманих залежностей наведено на діаграмах 2.9 - 2.11. На рис. 2.9 показано залежність ймовірності помилкового визначення максимуму взаємкореляційної функції від нормованого зміщення частоти при $\text{SNR} = 0 \text{ дБ}$.

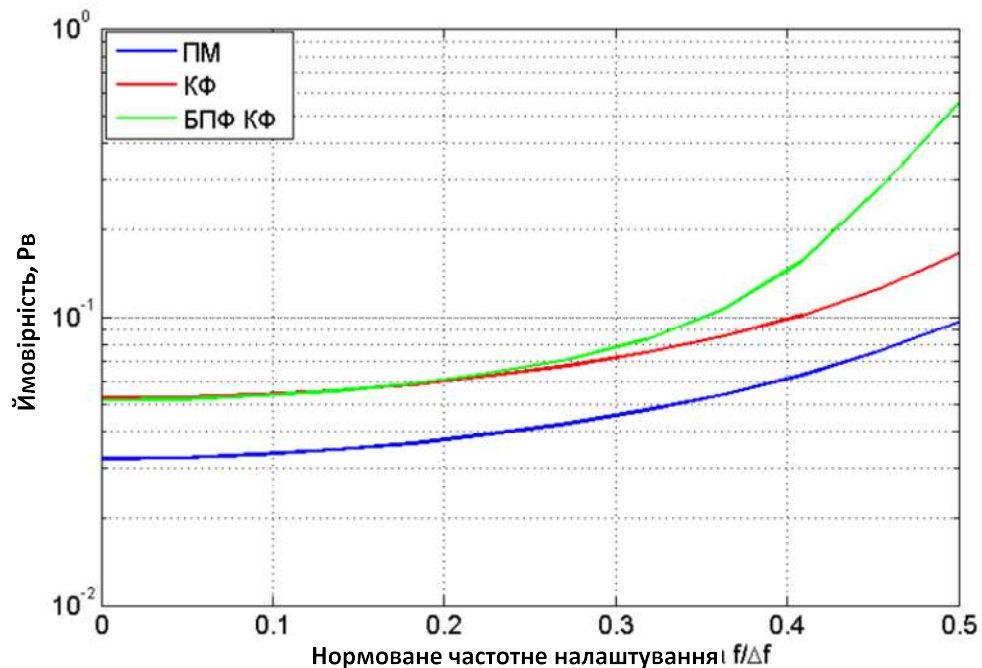


Рисунок 2.9 – Залежність ймовірності помилкового визначення максимуму взаємкореляційної функції (P_e) від нормованої частотної настройки для відношення сигнал/шум = 0 дБ

Для всіх каналів метод, заснований на результатах ШПФ, практично демонструє ті ж самі результати, що й класичний метод, коли нормоване зміщення частоти $f / \Delta f < 0,25$. Проте, коли це значення перевищується, у методі на основі БПФ спостерігається погіршення точності порівняно з класичним методом.

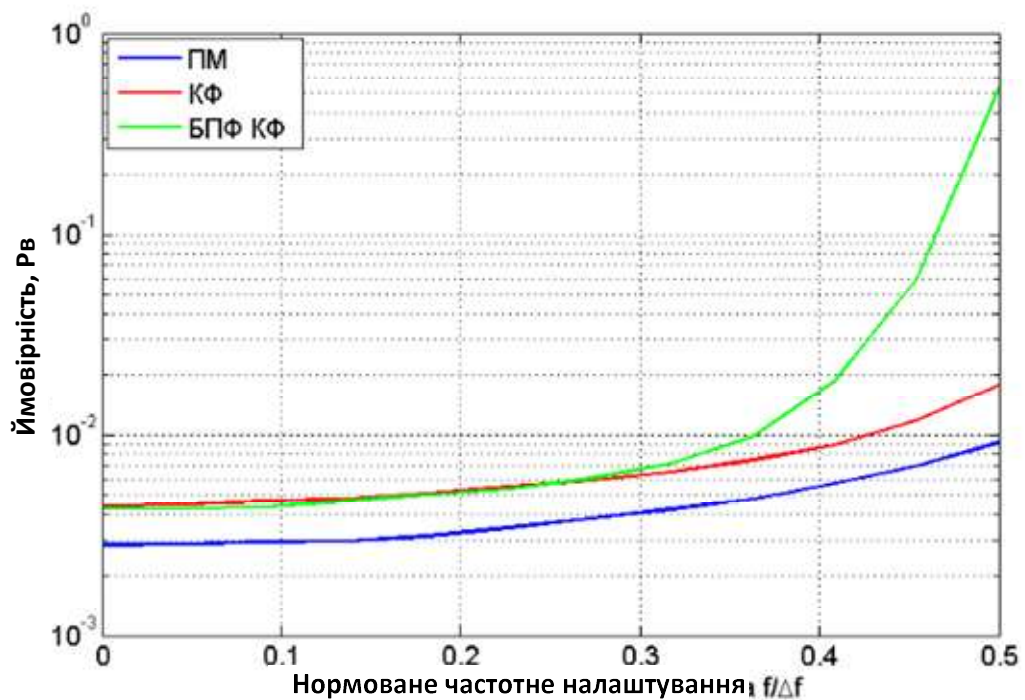


Рисунок 2.10 – Залежність ймовірності помилкового визначення максимуму взаємкореляційної функції (P_v) від нормованої частоти для відношення сигнал/шум = 10 дБ

На рис. 2.10 відображено перевагу запропонованого методу над класичним у всьому розглянутому діапазоні нормованого зміщення частоти $f / \Delta f$ для моделі каналу ЕРА. Класичний метод дозволяє отримати ймовірність на рівні $P_v \approx 5 \cdot 10^{-2}$ при нормованому зміщенні частоти $f / \Delta f = 0$, тоді як запропонований метод досягає такого ж результату при $f / \Delta f = 0,35$.

На рис. 2.11 відображено, як ймовірність помилкового визначення максимуму взаємкореляційної функції змінюється в залежності від нормованого зміщення частоти при $\text{SNR} = 20$ дБ.

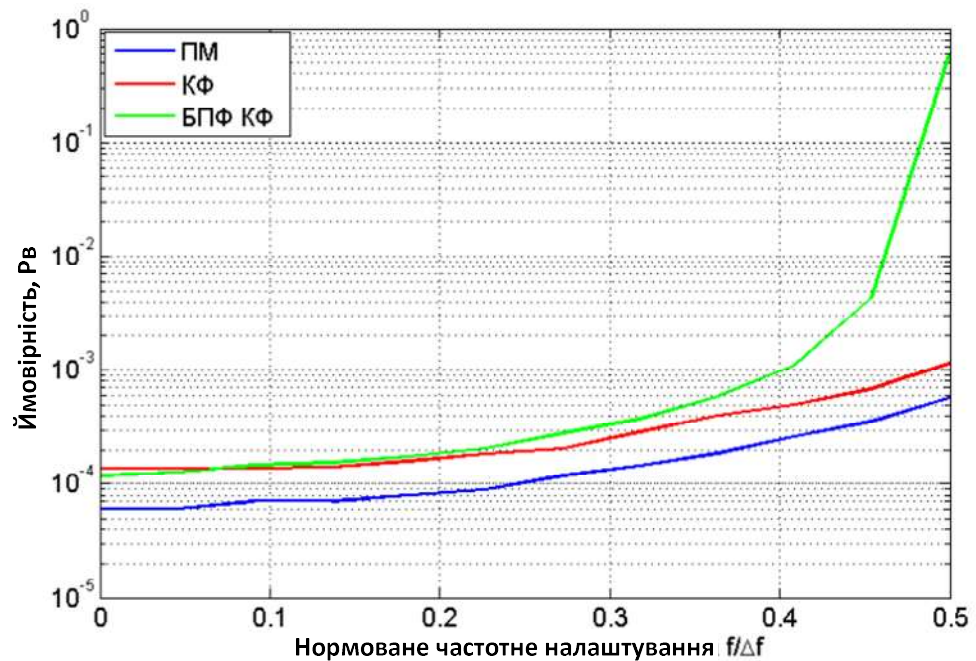


Рисунок 2.11 – Залежність ймовірності помилкового визначення максимуму взаємкореляційної функції (P_v) від нормованої частоти для відношення сигнал/шум = 20 дБ

З рисунків 2.10 і 2.11 видно, що у випадку каналу ЕРА збільшення SNR призвело до значного погіршення ймовірності P_v для методу, що базується на результаті ШПФ, порівняно з класичним методом. Тим не менше, запропонований метод відображає зниження ймовірності в цьому діапазоні значень нормованого зміщення частоти порівняно з класичним методом. Характер кривих для обох методів практично ідентичний [16].

При $\text{SNR} = 10$ дБ спостерігається значне зростання ймовірності зі збільшенням нормованого зміщення частоти, як для методу, що базується на результаті БПФ, так і для класичного методу, порівняно із запропонованим.

2.4 Висновки до розділу

Було проведено комплексне дослідження параметрів сигналу в мережах стандарту LTE, використовуючи різноманітні методи. Описано методи визначення ширини смуги сигналу, ідентифікацію самого сигналу та виявлення синхронізаційних сигналів.

В результаті проведених досліджень було описано та вдосконалено декілька методів, спрямованих на точне та ефективне вимірювання параметрів сигналу LTE, включаючи визначення ширини смуги, ідентифікацію сигналу та детектування синхронізаційних сигналів.

Запропонований метод визначення ширини смуги сигналу LTE на основі кореляційної кривої циклічного префіксу показав високу точність для каналів з замираннями (EPA, EVA і ETU), порівняно з методами на основі вейвлет-перетворення. Метод є стійким до замирань і дозволяє отримувати точні вимірювання навіть при низькому відношенні сигналу до шуму.

Виявлено, що запропоновані методи визначення інших характеристик сигналів, також демонструють стійкість до різних умов експлуатації телекомунікаційного середовища та забезпечують високу точність вимірювань навіть при низьких рівнях відношення сигналу до шуму. Отримані результати свідчать про значний прогрес у розумінні та вимірюванні параметрів сигналу LTE, що може відігравати ключову роль у подальшій оптимізації та підвищенні ефективності мереж стандарту LTE.

3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ СИГНАЛІВ LTE

3.1 Визначення напрямку передачі сигналу LTE

Запропонований підхід ґрунтується на використанні первинного та вторинного синхросигналів у стандарті LTE для синхронізації у низхідному напрямку. Процедура починається з виявлення первинного синхросигналу, після чого приймається рішення щодо передачі у низхідному або у висхідному напрямку в залежності від успішності виявлення.

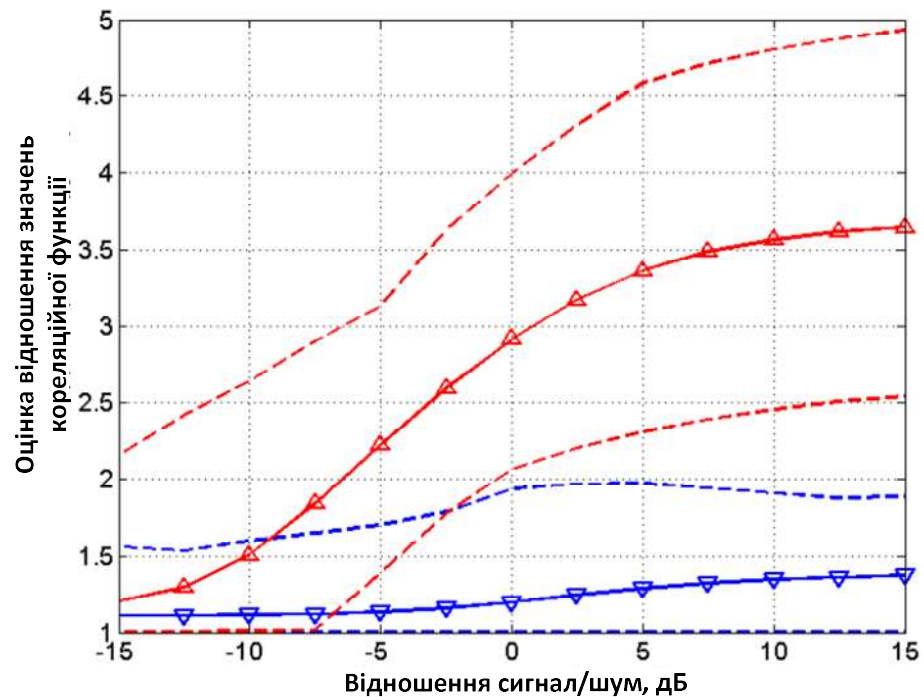


Рисунок 3.1 – Залежність оцінки значень кореляційних функцій від співвідношення сигнал/шум

Рис. 3.1 демонструє, як червона суцільна лінія відображає відношення максимального значення кореляційної функції між трьома каналами обробки

(для кожного можливого варіанта первинного синхросигналу) до найбільшого максимального значення з двох інших каналів.

Синя лінія показує максимальне співвідношення між максимальними значеннями кореляційних функцій у каналах, де отримані максимальні значення кореляційних функцій не виявилися найбільшими серед трьох спостережуваних каналів. Пунктирні лінії відповідних кольорів показують діапазон допуску. Результати отримані шляхом усереднення великої кількості значень [18].

На рис. 3.2 показано, як залежність точності ідентифікації первинного синхросигналу змінюється в залежності від відношення сигнал/шум.

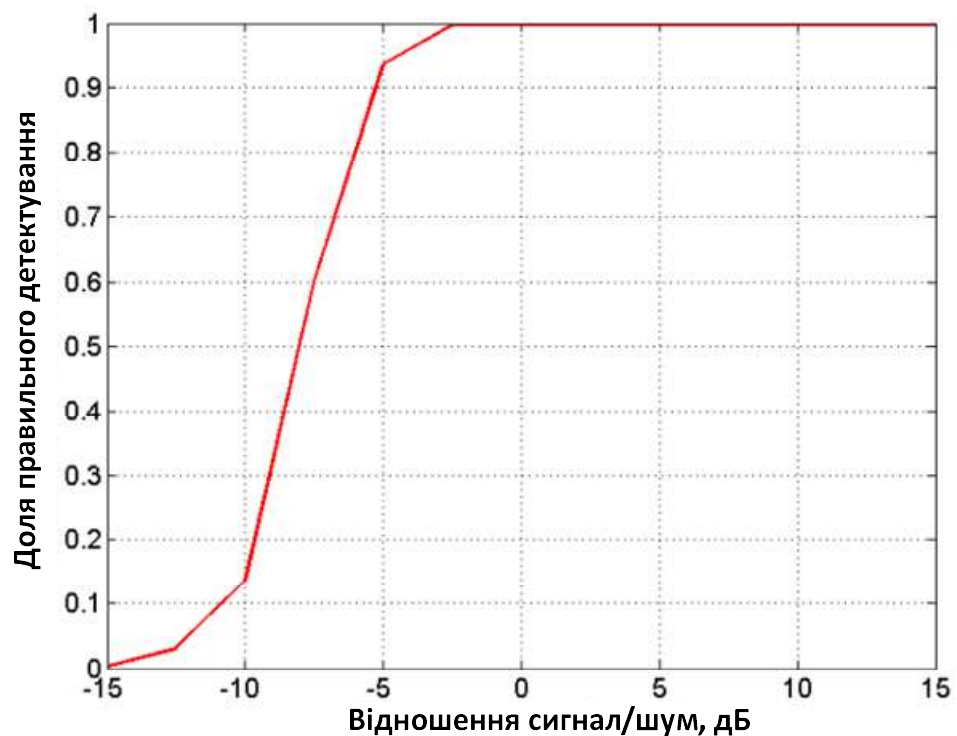


Рисунок 3.2 – Залежність точності ідентифікації первинного синхросигналу від співвідношення сигнал/шум

Алгоритм аналізує кореляційні функції трьох зразків первинного синхросигналу, відомих на приймальному боці, з фрагментами прийнятого сигналу. Після аналізу максимальних значень кореляційних функцій в

кожному каналі обробки робиться висновок про прийнятий первинний синхросигнал. Однак, у разі невідомості напрямку сигналу може виникнути помилка у визначенні використовуваного синхросигналу.

Ця особливість може використовуватися для виявлення первинного синхросигналу і подальшої передачі у низхідному напрямку. Якщо сигнал приймається у висхідному напрямку, то значення співвідношення максимумів у кожному з каналів обробки буде трохи більше 1,2.

3.2 Моделювання структури сигналу з ФМ та КАМ модуляціями

Було апробовано метод ідентифікації, який базується на максимальному значенні спектральної щільності потужності нормованої центрованої миттєвої амплітуди [19]:

$$P_{ap} = \frac{\max \left| FFT\left(\frac{S(n)}{m_a} - 1\right) \right|^2}{N_s}, \quad (3.1)$$

де FFT – дискретне перетворення Фур'є; $S(n)$ – прийнятий сигнал; m_a – математичне очікування прийнятого сигналу.

Цей метод дозволяє розпізнавати фазову модуляцію та квадратурну амплітудну модуляцію як класи, але не надає можливості розрізнити різні види позиційності модуляції. На рис. 3.3 представлені залежності ключових параметрів для ФМ-2, ФМ-4, КАМ-16 та КАМ-64: синя лінія відповідає ФМ-2, рожева - ФМ-4, чорна - КАМ-16, а зелена - КАМ-64.

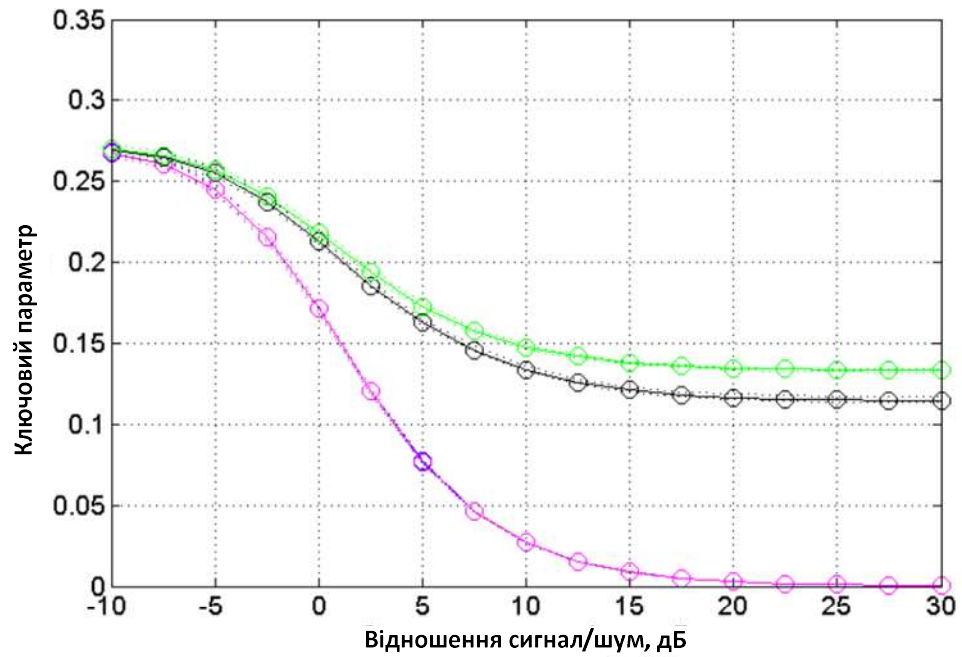


Рисунок 3.3 – Залежність ключового параметра від відношення сигнал/шум апробованого методу на підносійних сигналу LTE UL

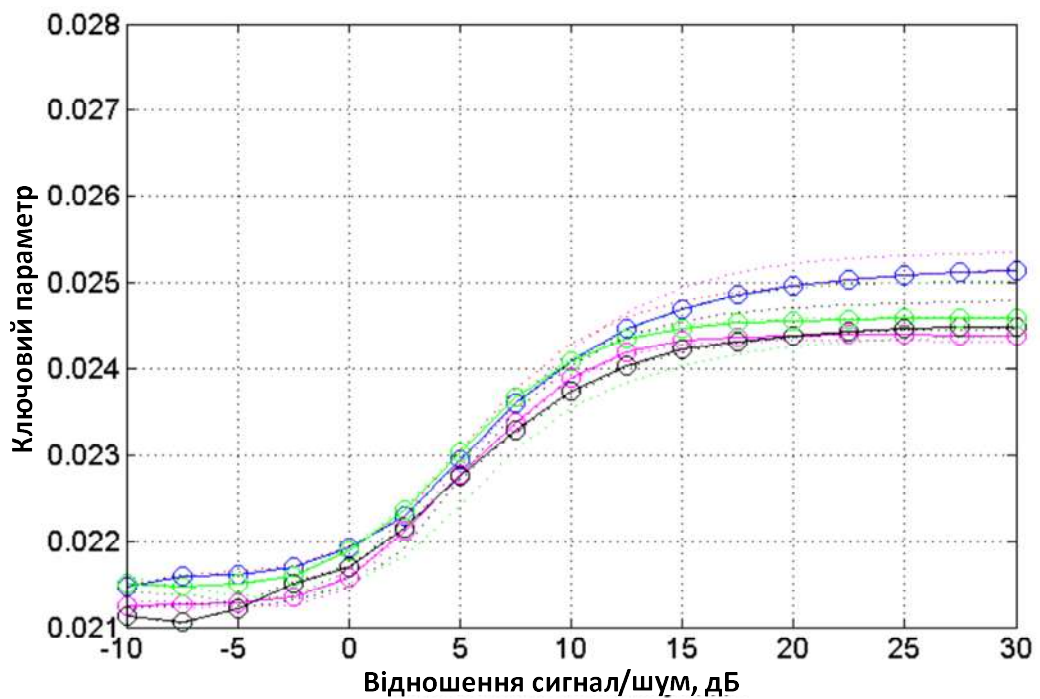


Рисунок 3.3 – Залежність ключового параметра від відношення сигнал/шум апробованого методу на підносійних сигналу LTE DL

З рисунку 3.3 можна відмітити, що при достатньому усередненні різницю між модуляцією КАМ-16 та КАМ-64 у сигналі LTE можна зробити незначною, до 0 дБ. В той же час параметри ФМ-2 та ФМ-4 майже повністю збігаються.

Для випадку низхідного каналу зв'язку (Download, DL) розглянуті методи модуляції фактично не відрізняються (рис. 3.4).

Даний підхід ґрунтується на завданні вимірювання поточного відношення сигнал/шум без використання опорних сигналів. У стандарті LTE, як і в OFDM системах загалом, застосовується захисний інтервал, відомий як циклічний префікс, для боротьби з міжсимвольною інтерференцією [20].

Це означає розділення тривалості символу на корисну частину та циклічний префікс, який формується шляхом дублювання певної кількості відліків з кінця символу на його початок. Ця властивість є основою запропонованого методу.

3.3 Моделювання характеристик якості сигналу

На вхід бідь якої системи завжди поступає суміш сигналу з шумом

$$S(t) = S_{OFDM}(t) + n(t), \quad (3.2)$$

де $S_{OFDM}(t)$ - переданий сигнал; $n(t)$ - адитивний білий гаусовий шум (АБГШ).

Потім сигнал проходить послідовно-паралельне перетворення, отримуючи структуру кадру з N вимірами (N – кількість вимірів у символі OFDM). Метод передбачає ідеальну роботу системи символьної синхронізації, що дозволяє безпомилково виділяти циклічний префікс та його відображення з інформаційної послідовності. Кожен кадр на виході нормується так, щоб його середня потужність дорівнювала одиниці. З накопиченої послідовності

обираються виміри, що відповідають циклічному префіксу та його відображенню.

З урахуванням шуму в каналі циклічний префікс можна записати як [20]:

$$S_1(t) = S_{cp}(t) + n_1(t), \quad (3.3)$$

де $S_{cp}(t)$ – неспотворений циклічний префікс.

Тепер можемо знайти автокореляційну функцію (АКФ) даного циклічного префіксу [19]:

$$\begin{aligned} R_{s1s1}(\tau) = & \int S_{cp}(t)S_{cp}(t-\tau)dt + \int S_{cp}(t)n_1^*(t-\tau)dt + \\ & + \int n_1(t)\int S_{cp}^*(t)(t-\tau)dt + \int n_1(t)n_1^*(t-\tau)dt. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Значення відношення сигнал/шум у смузі сигналу можна знайти як:

$$SNR = \log_{10}\left(\frac{R_{s1s2mean}(0)}{R_{s1s1mean}(0) - R_{s1s2mean}(0)}\right). \quad (3.5)$$

Проте точність оцінки відношення сигнал/шум у такому методі низька. З цієї причини було запропоновано альтернативний підхід. Одним з ключових параметрів для визначення відношення сигнал/шум є потужність шуму P , яка визначається як [19]:

$$P = \log_{10}(R_{s1s1mean}(0) - R_{s1s2mean}(0)). \quad (3.6)$$

Загальний принцип методу такий: спочатку сигнал з шумом $z(t)$ подається на послідовно-паралельний перетворювач, потім через нормуючий пристрій, що забезпечує потужність суміші на рівні 1 Вт. Далі сигнал проходить через два селектори: один відбирає відліки, що відповідають циклічному префіксу, а інший – його відображенню. Після цього отримуємо дві гілки обробки

сигналу, які обчислюють авто- та взаємнокореляційні функції. На цьому етапі отримуємо ключовий параметр, який перетворюється у поточне значення відношення сигнал/шум.

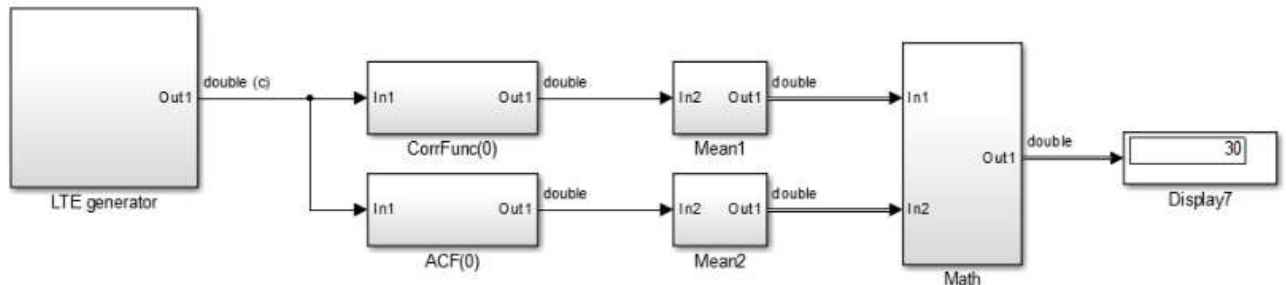


Рисунок 3.4 – Схема імітаційної моделі

Під час оцінки SNR у середовищі MATLAB/Simulink були використані наступні параметри: ширина смуги 1,4 МГц, нормальний циклічний префікс, модуляція ФМ-4, напрямок передачі - downlink.

Моделювання виконувалося для каналу з АБГШ при ідеальній роботі системи символної синхронізації. Результати моделювання мають достовірність 0,997, а відносна похибка складає не більше $4,2 \cdot 10^{-6}$. Схема імітаційної моделі представлено на рис. 3.4.

Залежність нормованих значень авто- та взаємнокореляційної функції від поточного значення відношення сигнал/шум зображена на рис. 3.5 для смуги сигналу 1.4 МГц, де нормування проведено до максимального значення взаємнокореляційної функції.

Залежність ключового параметра P від поточного значення відношення сигнал/шум представлена на рис. 3.6, де на інтервалі від -5 до 30 дБ вона може бути апроксимована поліномом. Рішення отриманого полінома дозволяє отримати оцінку значення відношення сигнал/шум.

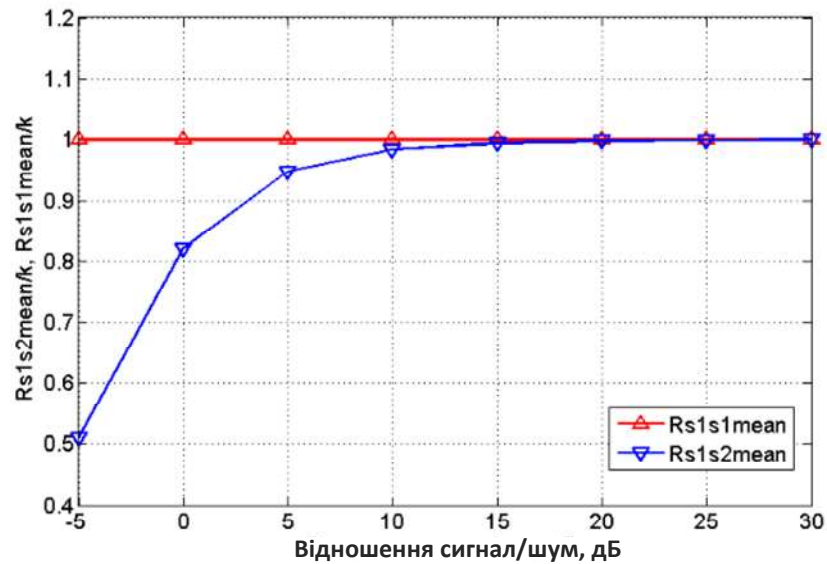


Рисунок 3.5 – Залежність нормованих значень кореляційних функцій від поточного відношення сигнал/шум

Проведене імітаційне моделювання показало, що запропонований метод забезпечує систематичну помилку оцінки відношення сигнал/шум менше 0,004 дБ на інтервалі від -5 до 30 дБ для лінії сигналу з шириною 1,4 МГц. Ця оцінка була проведена на основі обчислення відношення сигнал/шум по 100 слотах ($M=100$) з тривалістю 50 мс.

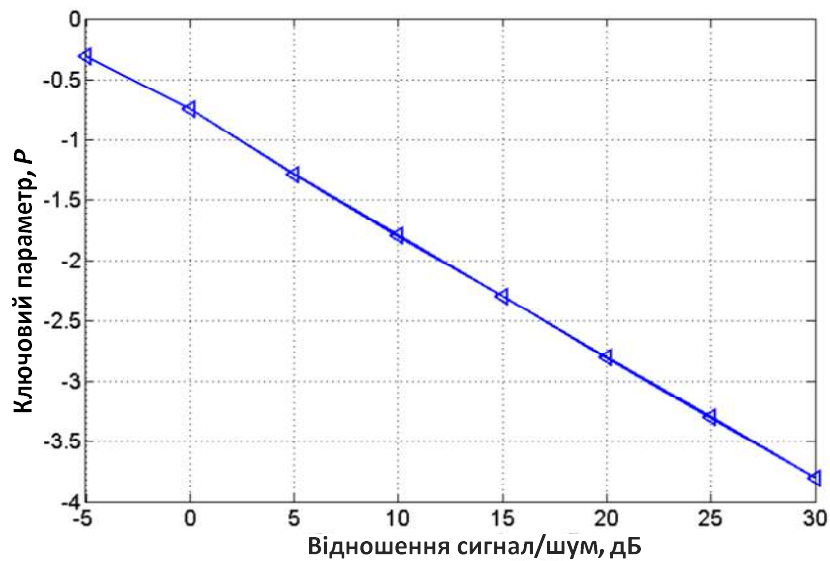


Рисунок 3.6 – Залежність ключового параметра Р від поточного відношення сигнал/шум

Залежність середньоквадратичного відхилення (СКВ) оцінки відношення сигнал/шум для різних значень середніх результатів M , показана на рис. 3.7.

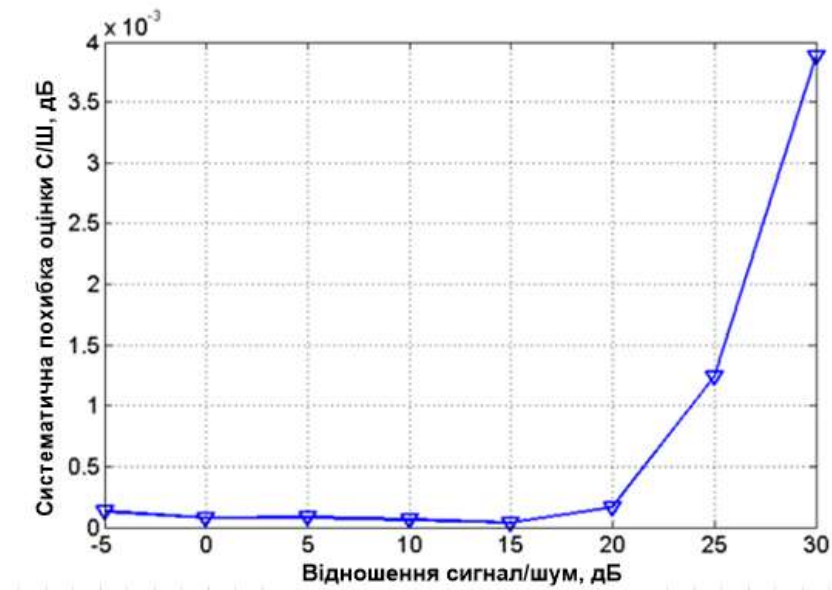


Рисунок 3.7 – Залежність похибки визначення С/Ш від поточного значення С/Ш

На інтервалі від -5 до 30 дБ запропонований метод забезпечує СКВ оцінки відношення сигнал/шум менше 0.11 дБ, проте на інтервалі від 5 до 30 дБ воно менше 0.07 дБ.

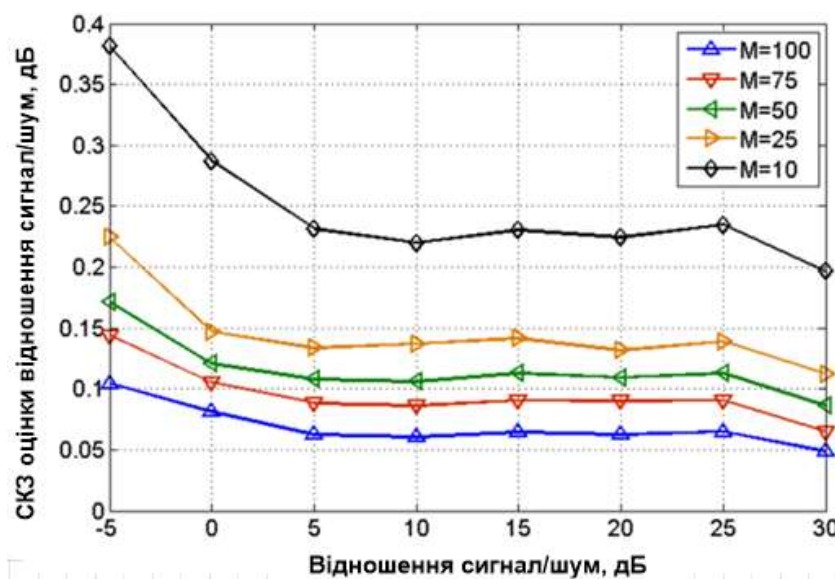


Рисунок 3.8 – Залежність СКВ помилки оцінки С/Ш від поточного С/Ш

Аналіз результатів демонструє, що запропонований метод NDA виявляється так само точним, як і DA методи, що описані в [21], але діє в ширшому діапазоні відношення сигнал/шум.

Представлені вище характеристики методу відображають роботу системи символної синхронізації в ідеальних умовах.

Результати моделювання для випадків з розширеним циклічним префіксом та різною шириною смуги сигналу (1,4, 5 та 20 МГц) подані на рис. 3.9 - 3.11.

Лінія « $\tau = 0$ » представляє ідеальну синхронізацію символів (синій колір), « $\tau = 1$ » відображає помилку в 1 відліку (зелений колір), а « $\tau = 3$ » – розсинхронізацію на 3 відліки (фіолетовий колір).

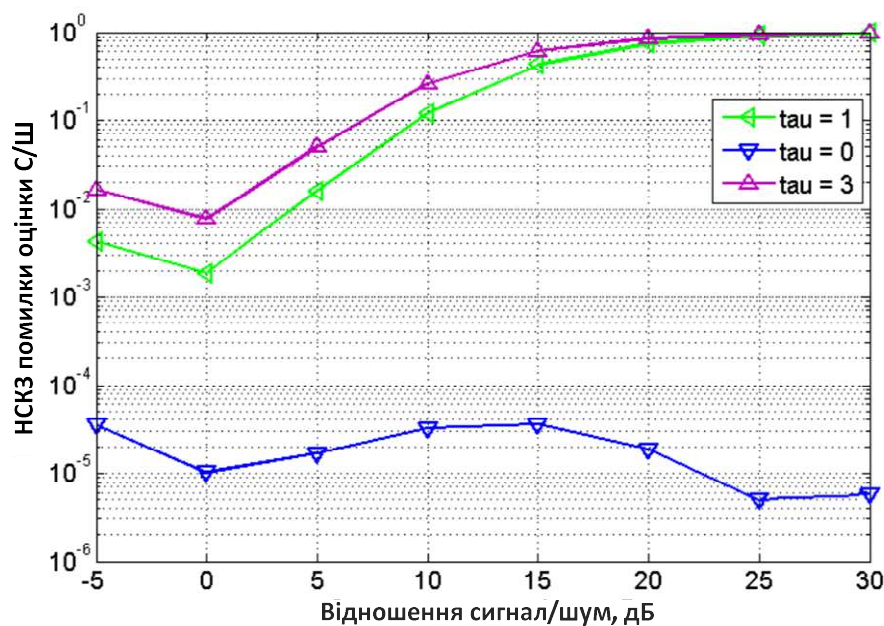


Рисунок 3.9 – Залежність НСКЗ помилки оцінки С/Ш від поточного відношення С/Ш при ідеальній та неідеальній часовій синхронізації. Смуга сигналу 1,4 МГц

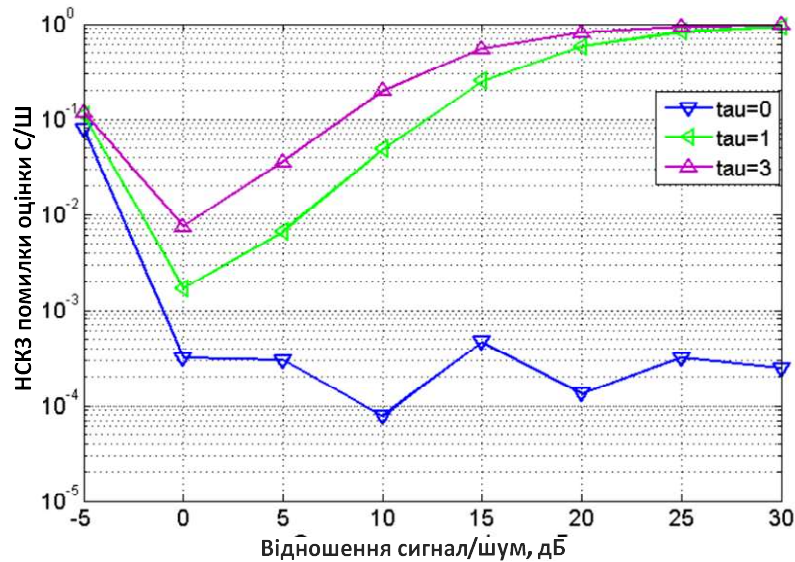


Рисунок 3.10 – Залежність НСКЗ помилки оцінки С/Ш від поточного відношення С/Ш при ідеальній та неідеальній синхронізації.

Смука сигналу 5 МГц

Виявлено, що при смузі 1,4 МГц та ідеальній синхронізації помилки оцінки відношення сигнал/шум для розширеного префікса менше, ніж для нормального, завдяки більшій кількості відліків у циклічному префіксі.

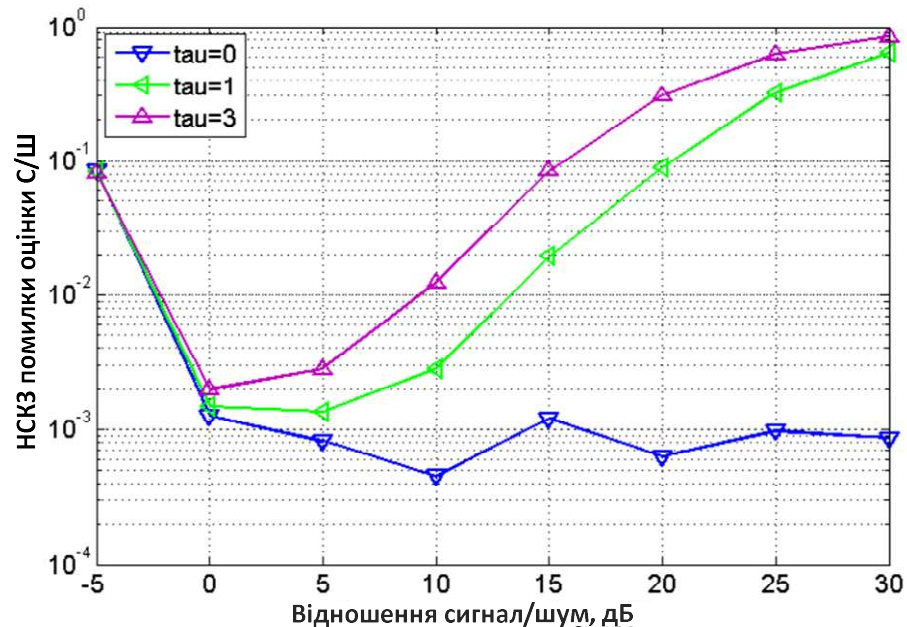


Рисунок 3.11 – Залежність НСКЗ помилки оцінки С/Ш від поточного відношення С/Ш при ідеальній та неідеальній синхронізації.

Смука сигналу 20 МГц

Символьна розсинхронізація навіть при малій кількості відліків призводить до значного погіршення оцінки відношення сигнал/шум при високих рівнях сигналу, причому вплив розсинхронізації найменший для смуги в 20 МГц і найбільший для смуги в 1,4 МГц. Зокрема, розсинхронізація при смузі 20 МГц дозволяє використовувати аналізований метод при рівнях сигналу від 0 до 10 дБ з помилкою оцінки не більше $2 \cdot 10^{-10}$. При смугах 1,4 та 5 МГц значення помилки оцінки становить $2 \cdot 10^{-10}$ лише при рівнях сигналу 0 дБ.

3.4 Висновки до розділу

Було проведено імітаційне моделювання та ідентифікація сигналів LTE, розглянуто врахування напряму передачі сигналу та моделювання його структури за допомогою різних типів модуляцій, таких як ФМ та КАМ.

Під час моделювання було ретельно проаналізовано параметри якості сигналу, зокрема відношення сигнал/шум. Виявлено, що методи імітаційного моделювання добре підходять для оцінки сигналів LTE та їхньої якості. Це надає можливість отримати важливі дані для підтримки та оптимізації роботи мереж на основі LTE.

Аналіз результатів дозволяє зробити висновок про те, що імітаційне моделювання та ідентифікація сигналів LTE є потужними інструментами для дослідження різноманітних аспектів мережевих систем LTE. Отримані дані підтверджують ефективність імітаційного моделювання для аналізу сигналів LTE та їхньої якості. Методи імітаційного моделювання є ключовим інструментом для дослідження та аналізу мереж LTE і можуть сприяти покращенню якості обслуговування та оптимізації їх роботи.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Оцінка параметрів сигналу стандарту LTE відбувалася в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На працівника могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищена чи понижена вологість повітря;
- підвищений рівень статичної електрики;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

Відповідно до визначених факторів розробляємо рішення щодо безпечного виконання роботи під час оцінки параметрів сигналу стандарту LTE [21].

4.1. Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

4.1.1. Обладнання робочого місця

Робоче місце під час оцінки параметрів сигналу стандарту LTE обладнане великою кількістю технічних пристроїв. Це перш за все персональний комп'ютер, принтер, сканер, ксерокс, і різноманітні засоби телефонного зв'язку.

Організація робочого місця проектувальника забезпечує відповідність усіх елементів робочого місця та їх розташування ергономічним вимогам характеру та особливостями трудової діяльності.

При розміщенні робочих місць з ПК було дотримано таких вимог:

- відстань між бічними поверхнями ПК менша за 1,2 м;
- відстань між тильною поверхнею однієї ПК та екраном іншої не менша 2,5 м;
- прохід між рядами робочих місць не менший 1 м. Вимоги цього пункту щодо відстані між бічними поверхнями ПК та відстані між тильною поверхнею однієї ПК та екраном іншого враховуються також при розміщенні робочих місць з ПК в суміжних приміщеннях, з урахуванням особливостей стін та перегородок [22].

Організація робочого місця, яке передбачає використання ПК для управління технологічним обладнанням повинна передбачати:

- достатній простір для працівника;
- вільну досяжність органів ручного управління в зоні моніторного поля: відстань по висоті – 900-1330 мм, по глибині – 400-500 мм;
- розташування екрану ПК в робочій зоні, яке забезпечувало б зручність зорового спостереження, а також зручність використання ПК під час коригування керуючих програм одночасно з використання основних виробничих операцій;
- можливість повертання екрана ПК навколо горизонтальної та вертикальної осі.

Конструкція робочого місця проектувальника (при роботі сидячи) забезпечує підтримання оптимальної робочої пози з такими ергономічними характеристиками:

- ступні ніг – на підлозі або на підставці для ніг;
- стегна – в горизонтальній площині;
- передпліччя – вертикально;

- лікті – під кутом 70° - 90° до вертикальної площини;
- зап'ястя зігнуті під кутом не більше 20° відносно горизонтальної площини;
- нахил голови - 20° відносно вертикальної площини [23].

Розміщення принтера на робочому місці забезпечує добру видимість екрану ПК, зручність ручного керування пристроєм введення-виведення інформації в зоні досяжності моторного поля: по висоті 900-1300 мм, по глибині 400-500 мм.

Висота робочої поверхні столу для ПК має бути в межах 680-800 мм, а ширина – забезпечувати можливість виконання операцій в зоні досяжності моторного поля. Рекомендовані розміри столу: висота – 725 мм, ширина – 600-1400мм, глибина – 800-1000 мм.

При приміщеннях з ПК мають бути обладнані побутові приміщення для відпочинку під час роботи, кімната психологічного розвантаження. В кімнаті психологічного розвантаження слід передбачити встановлення пристроїв для приготування й роздачі тонізуючих напоїв, а також місця для занять фізичною культурою.

Щодо вимог до режимів праці і відпочинку при роботі з ПК то під час роботи з ПК для збереження здоров'я працівників, запобігання профзахворюванням і підтримки працездатності встановлюються внутрішньо змінні регламентовані перерви для відпочинку [24].

У випадках, коли виробничі обставини не дозволяють застосовувати регламентовані перерви, тривалість безперервної роботи з ВДТ не повинна перевищувати 4 годин.

Усю будівлю, в тому числі і досліджуване приміщення, електрифіковано згідно з усіма відповідними нормами.

Лінії електромережі ПК, у приміщенні, де відбувалася оцінка параметрів сигналу стандарту LTE виконані як окрема групова трипровідна мережа шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників (заземлення або занулення), причому площі перерізу нульового

робочого і нульового захисного провідника повинні не менші за площу перерізу фазового провідника.

Заборонено під'єднувати обладнання до звичайної двопровідної електричної мережі, зокрема з використанням перехідних пристроїв. Електромережі штепсельних з'єднань та електричних розеток виконані за магістральною схемою, по 3-6 в одному колі.

Оскільки вони розташовані уздовж стін, то провідники прокладені по підлозі в металевих трубах і гнучких металевих рукавах. Металеві трубки і гнучкі металеві рукави заземлені [25]..

4.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1. Мікроклімат

Мікроклімат у виробничих приміщеннях описує умови внутрішнього середовища, що впливають на тепловий обмін працівників з їхнім оточенням. Ці умови визначаються за допомогою таких факторів, як температура, відносна вологість, швидкість руху повітря, температура поверхонь, що оточують людину, а також інтенсивність теплового (інфрачервоного) випромінювання.

Показниками, що характеризують мікроклімат, є: температура повітря ($^{\circ}\text{C}$), відносна вологість повітря (%), швидкість руху повітря (м/сек.), інтенсивність теплового випромінювання ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Робота під час оцінки параметрів сигналу стандарту LTE за енерговитратами відноситься до категорії 1a [26].

Допустимі параметри мікроклімату для категорії 1a (згідно ДСН 3.3.6.042-99 [27]) наведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1 – 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 відповідності встановленим стандартам щодо мікроклімату та чистоти повітря використовується система вентиляції. Загальна вентиляція служить для підтримання необхідних умов у приміщенні, а місцеві вентилятори використовуються для охолодження комп'ютерів та іншого обладнання. У холодні місяці року передбачено опалювання приміщення, яке здійснюється за допомогою центральної водяної системи опалення.

4.2.2. Склад повітря робочої зони

В приміщенні, де здійснюється оцінка параметрів сигналу стандарту LTE, можливими забруднювачами повітря може бути офісна техніка та пил, який потрапляє ззовні.

Загазованість – це наявність різноманітних газів у повітрі робочої зони, які, потрапляючи в організм людини через органи дихання, шкіряний покрив, шлунково-кишковий тракт, можуть спричинити отруєння й враження органів і систем життєзабезпечення. У зв'язку з цим сучасні методи виявлення отруйних речовин у повітрі й захист від них мають велике значення для забезпечення сприятливих умов для роботи. Для цього відбирають проби повітря на основних робочих місцях. За результатами аналізу взятих проб повітря судять про ступені шкідливості повітряного середовища [25].

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Фенол	0,01	0,01	3
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

Окрім хімічного складу, важливо також, щоб повітря мало певний іонний склад. У повітрі містяться негативні й позитивні іони. У закритих приміщеннях легкі іони поглинаються в процесі дихання, а також пилом, одягом тощо. Тому ступінь іонізації вважається досить добрим індикатором чистоти повітря. Експериментально підтверджено негативну дію деіонізованого повітря [27].

У людей з'являються сонливість, головний біль, підвищується артеріальний тиск тощо. Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл.4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

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

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи кондиціонування повітря, регулярного провітрювання, та вологого прибирання.

4.2.3. Виробниче освітлення

Виробниче освітлення нормується на робочих поверхнях.

Обираючи систему освітлення, виходять з погляду економічності або гігієнічності. Система комбінованого освітлення більш економічна і дозволяє на робочих місцях створювати високу освітленість. Система загального освітлення з погляду гігієни праці краща, тому що вона дозволяє створити рівномірний розподіл освітленості у всьому приміщенні, усунути різкі тіні й контрасти.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні під час оцінки параметрів сигналу стандарту LTE (згідно ДБН В.2.5-28-2018 [27]) зазначені у таблиці 4.4:

Таблиця 4.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фону	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Високої точності	0,3 -0,5	III	г	великий	світлий	700	300	5	2	3	1,2

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимально можливе бічне природне освітлення.
- 2) Штучне освітлення в приміщеннях з робочим місцем, обладнаним ВДТ, має здійснюватись системою загального рівномірного освітлення.

3) Для захисту від прямих сонячних променів, які створюють прямі та відбиті відблиски з поверхні екранів ПК і клавіатури повинні бути передбачені сонцезахисні пристрої, вікна повинні мати жалюзі або штори.

4.2.4. Виробничий шум

Шум – це найпоширеніше явище у промисловому виробництві. Не становить великих труднощів виявити наявність підвищених шумів і провести необхідні заміри, але зниження рівня шумів може вимагати істотних витрат.

Нормування шуму для робочих місць регламентується санітарними нормами ДСН 3.3.6.037-99 [28] та державним стандартом. Для постійних шумів нормування ведеться по граничному спектру шуму.

Під час оцінки параметрів сигналу стандарту LTE допустимі рівні звукового тиску повинні відповідати ГС, а рівні звуку L_A не повинні перевищувати 50 дБА (таблиця 4.5).

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного широкополосного шуму

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

Основними заходами боротьби з шумом є усунення або ослаблення причин шуму в самому його джерелі у процесі роботи, використання звукопоглинаючих матеріалів, раціональне планування виробничих приміщень.

4.2.5. Виробничі випромінювання

Оскільки оцінка параметрів сигналу стандарту LTE проводилася за допомогою ПК, то на робочому місці проектувальника можливий підвищений рівень електромагнітного випромінювання.

Сучасні наукові теорії не мають єдності щодо обґрунтування механізму впливу ЕМП на людину, особливо у випадку слабких електромагнітних випромінювань.

Таблиця 4.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/м ²
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/М	
Напруженість електромагнітного поля, 6 кГц...3 МГц	50	5	
3 МГц...30 МГц	2	-	
30 МГц...5 ГГц	-	-	10
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 інфрачервоній частині спектру: 0,76... 10,0 мкм			35,0... 70,0
Напруженість електричного поля ВДТ			20 В/м

Ступінь і характер впливу ЕМП на організм людини залежать: від інтенсивності випромінювання; частоти коливань; площі поверхні тіла, що

опромінюється; індивідуальних особливостей організму; режиму опромінення (безперервний чи переривчастий); тривалості впливу; комбінованої дії інших факторів виробничого середовища [28].

У діапазонах промислової частоти, радіочастот, інфрачервоного і частково ультрафіолетового світла електромагнітні поля чинять тепловий вплив.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітору комп'ютера представлені в табл. 4.6.

Захист персоналу від впливу електромагнітних полів здійснюється шляхом проведення організаційних та інженерно-технічних, лікувально-профілактичних заходів, а також використання засобів індивідуального захисту.

Таким чином, умови праці дослідника в цілому відповідають існуючим санітарно-гігієнічним нормам.

4.3. Пожежна безпека

В приміщенні, де здійснювалося оцінка параметрів сигналу стандарту LTE використовуються тільки негорючі речовини та матеріали у холодному стані, 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 будинок відноситься до другої категорії [27], що відповідає вимогам [28]. Робоча зона приміщення віднесена до класу вибухонебезпечності В-IIа та пожежонебезпечності П-IIа, оскільки вибухонебезпечна концентрація пилу і волокон може утворюватися лише внаслідок аварії або несправності.

4.3.1. Технічні рішення системи запобігання пожежі

У досліджуваному приміщенні немає легко займистих, самозаймається і вибухових речовин, потужних електроустановок і іскристого обладнання, механізмів з рухомими частинами, знос і корозія яких могли б призвести до пожежі. Всі основні причини виникнення пожежі практично виключені, однак 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.

3.2. Технічні рішення системи протипожежного захисту

Правила пожежної безпеки в досліджуваному приміщенні наступні:

- для всіх споруд і приміщень з ПК повинні визначатися категорії вибухо- і пожежонебезпеки та класу зон за Правилами влаштування електричних установок, значення яких вказують на дверях;
- носії інформації зберігаються в металевих касетах на негорючих стелажах і шафах, які разом з перфокартами, магнітними стрічками, пакетами магнітних дисків розміщуються у відокремлених приміщеннях;
- звукопоглинальне облицювання стін та стелі необхідно виготовляти з негорючих або важкогорючих матеріалів;
- для промивання деталей використовують мийні препарати, промивання горючими матеріалами дозволяється у спеціальних приміщеннях, обладнаних припливно-витяжною вентиляцією [29].

У всіх приміщеннях будинку на видному місці виведені плани евакуації із

зазначенням напрямків руху та шляхів евакуації, а також правила поведінки на випадок пожежі. Евакуація працівників на випадок пожежі відбувається через два виходи на сходові марші, розташовані по різні боки коридорів. Ширина шляхів евакуації не менше 1м, найбільше віддалення робочого місця від евакуаційного входу - 25м. Для гасіння пожежі всередині будівлі в ньому обладнаний внутрішній пожежний водопровід з пожежними кранами і підключеними до них пожежними рукавами. У кожному приміщенні та на поверхах встановлені вогнегасники ОП-5. Біля корпусу є пожежний щит, обладнаний вогнегасником, багром, лопатою, ломом і відром. Під щитом стоїть ящик з піском місткістю 5м³.

4.4 Висновки до розділу:

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

ВИСНОВКИ

Проаналізовано основні особливості стандарту LTE, вивчено фізичний рівень стандарту LTE, детально розглянуті технології OFDM та SC-OFDM, можливі конфігурації з точки зору ширини смуги сигналу, вивчена структура кадрів для випадку частотного та часового дуплексу, структура слотів, принцип формування циклічного префіксу, досліджені основні фізичні канали для низхідного та висхідного напрямків, канали управління, сигнали синхронізації, тощо.

Розроблено імітаційну модель фізичного рівня стандарту LTE в середовищі MATLAB/Simulink, наведені структурні схеми з описом призначення блоків, а також опис можливостей моделі. Проведено успішну верифікацію моделі. Встановлено, що розроблена модель дійсно є моделлю стандарту LTE за повним збігом характеристик (значення підтримуваних смуг сигналу, форма спектра, підтримка OFDM для низхідного та SC-OFDM для висхідного напрямку, тривалості OFDM символів і символів на піднесених, тривалостей нормального та розширеного циклічного префікса і т.д.).

Розроблена модель може бути застосована для дослідження алгоритмів та методів ідентифікації та оцінки параметрів сигналу стандарту LTE.

Було проведено комплексне дослідження параметрів сигналу в мережах стандарту LTE, використовуючи різноманітні методи. Описано методи визначення ширини смуги сигналу, ідентифікацію самого сигналу та виявлення синхронізаційних сигналів.

В результаті проведених досліджень було описано та вдосконалено декілька методів, спрямованих на точне та ефективне вимірювання параметрів сигналу LTE, включаючи визначення ширини смуги, ідентифікацію сигналу та детектування синхронізаційних сигналів. Запропонований метод визначення ширини смуги сигналу LTE на основі кореляційної кривої циклічного префіксу показав високу точність для каналів з замираннями (EPA, EVA і ETU), порівняно з методами на основі вейвлет-перетворення. Метод є

стійким до замирань і дозволяє отримувати точні вимірювання навіть при низькому відношенні сигналу до шуму.

Виявлено, що запропоновані методи визначення інших характеристик сигналів, також демонструють стійкість до різних умов експлуатації телекомунікаційного середовища та забезпечують високу точність вимірювань навіть при низьких рівнях відношення сигналу до шуму.

Отримані результати свідчать про значний прогрес у розумінні та вимірюванні параметрів сигналу LTE, що може відігравати ключову роль у подальшій оптимізації та підвищенні ефективності мереж стандарту LTE.

Було проведено імітаційне моделювання та ідентифікація сигналів LTE, розглянуто врахування напряду передачі сигналу та моделювання його структури за допомогою різних типів модуляцій, таких як ФМ та КАМ.

Під час моделювання було ретельно проаналізовано параметри якості сигналу, зокрема відношення сигнал/шум. Виявлено, що методи імітаційного моделювання добре підходять для оцінки сигналів LTE та їхньої якості. Це надає можливість отримати важливі дані для підтримки та оптимізації роботи мереж на основі LTE.

Аналіз результатів дозволяє зробити висновок про те, що імітаційне моделювання та ідентифікація сигналів LTE є потужними інструментами для дослідження різноманітних аспектів мережевих систем LTE. Отримані дані підтверджують ефективність імітаційного моделювання для аналізу сигналів LTE та їхньої якості. Методи імітаційного моделювання є ключовим інструментом для дослідження та аналізу мереж LTE і можуть сприяти покращенню якості обслуговування та оптимізації їх роботи.

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mehdi Alesti, Quality of Service in WiMAX and LTE Networks// Mehdi Alasti and Behnam Neekzad, Clearwire Jie Hui and Rath Vannithamby - Intel Labs, IEEE Communications Magazine, 2010. – 225 p.
2. Fei Liu «A Novel QoE-Based Carrier Scheduling Scheme in LTEAdvanced Networks with Multi-Service» // Wei Xiang, Yueying Zhang, - Program for New Century Excellent Talents in University (Grant No. NCET-11-0600), and Graduate Innovation Fund of HUAXING CHUANGYE & SICE, BUPT, 2011 p.
3. Мірось Ю. О., Сабурова С. О., “Перспективи розвитку технології мобільного зв’язку 4G” представлена на П’ятій міжнародній науково-технічній конференція “Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв’язку, EMC-2020”. 102-106 с.
4. Moskalets M., Naors Y Anad Alsaleem. “IMPROVE MECHANISMS OF RANDOM MULTIPLE ACCESS IN WIRELESS COMMUNICATIONS SYSTEMS” 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkov, 2020, pp. 1-6.
5. R. Barco «Estimation of Link-Layer Quality Parameters in a SystemLevel LTE Simulator» // University of Malaga, Communications Engineering Dept., Malaga, Spain, IEEE – 2010 p.
6. J. G. Andrews, A. Ghosh and R. Muhammad, “Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking,” Prentice Hall, Saddle River, 2017.
7. L. Hanzo, Y.(J.) Akhtman, L. Wang, and M. Jiang, “MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMax. Coherent versus non-coherent and cooperative turbo-transceivers,” UK: J.W.S., 658 P, 2011.
8. C. Li, G. Li, and H. Liu, “Performance comparison of the STBC-OFDM decoders in a fast fading channel,” Journal of Marine Science and Technology, vol. 20, no. 5, pp. 534–540, 2012, doi: 10.6119/JMST-011-0506-3.

9. E. Basar, U. Aygolu, P. Erdal, and V. Poor, "Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 16, no. 22, pp. 5536–5549, 2013.
10. M.I. Naumenko, and V.I. Solodovnick, "Signal-Code Construction Based on Space-Time Block Coding with Dual-Mode Index Modulation Aided OFDM," *IEEE International Scientific and Practical Conference Problems of infocommunications. Science and technology PIC S&T*, Kyiv, Ukraine, vol. 1, pp. 57–62, 2019.
11. Бондар В. С. Дослідження програмно-конфігурованих мереж / В. С. Бондар, О. С. Палагута // Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 16-17 листопада 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — Том 2. — С. 21. — (Комп'ютерно-інформаційні технології та системи зв'язку).
12. Hayat MS, Kazmi SIA, Hasan R, and Bhatti AH (2016). An architecture of future wireless network for smart cities by improving 4G LTE wireless network. In the 3rd MEC International Conference on Big Data and Smart City, IEEE, Muscat, Oman:1-5.
13. Марценко С. В. Дослідження впровадження технологій 4G в мережах операторів зв'язку / С. В. Марценко, В. С. Бондар, О. С. Палагута // Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 16-17 листопада 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — Том 2. — С. 114. — (Комп'ютерно-інформаційні технології та системи зв'язку).
14. Li WY, Zhang X, Jia SC, Gu XY, Zhang L, Duan XY, and Lin JR (2013). A novel dynamic adjusting algorithm for load balancing and handover co-optimization in LTE SON. *Journal of Computer Science and Technology*, 28(3): 437-444.
15. Обод І.І. Адаптивна оптимізація швидкості передачі інформації в системах радіодоступу за наявності завад /Обод І.І., Алалі А.М., Фатроні М./ Вісник національного технічного університету «ХПІ». Секція Техніка та електрофізика високих напруг №27(1000) 2013 р. с. 119-124.

16. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології [електронний ресурс]: підручник у 2-х томах. /О. В. Лемешко, В. А. Лошаков, В. В. Поповський, Сабурова С. О. та ін.// за редакцією В. В. Поповського.-Х.: ТОВ “Компанія СМІТ”, 2018. Режим доступу до ресурсу: <http://www.smitbook.com/books.html>- 1012 с.

17. Мірось Ю. О., Сабурова С. О., “Перспективи розвитку технології мобільного зв'язку 4G” представлена на П'ятій міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку, ЕМС-2020”. 102-106 с.

18. Телекомунікаційні системи та мережі. Структура й основні функції. [електронний ресурс] : мультимед. підручник, Том 1// За редакцією В. В. Поповського, Харків, ТОВ “Компанія СМІТ”, 2018 р. Режим доступу до ресурсу: <http://www.znanius.com/3533.html> - 1012с.

19. C. Yu, W. Xiangming, L. Xinqi, and Z. Wei1, "Research on the modulation and coding scheme in LTE TDD wireless network," In ICIMA 2019, pp. 468 - 471, 2012.

20. M. S. Sharawi, "RF Planning and Optimization for LTE Network," in LTE Planning and Optimization, Boca Raton Florida, CRC Press, 2010, pp. 399-431.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

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

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

27. 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>

28. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.

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.

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛУ СТАНДАРТУ LTE

(назва бакалаврської дипломної роботи)

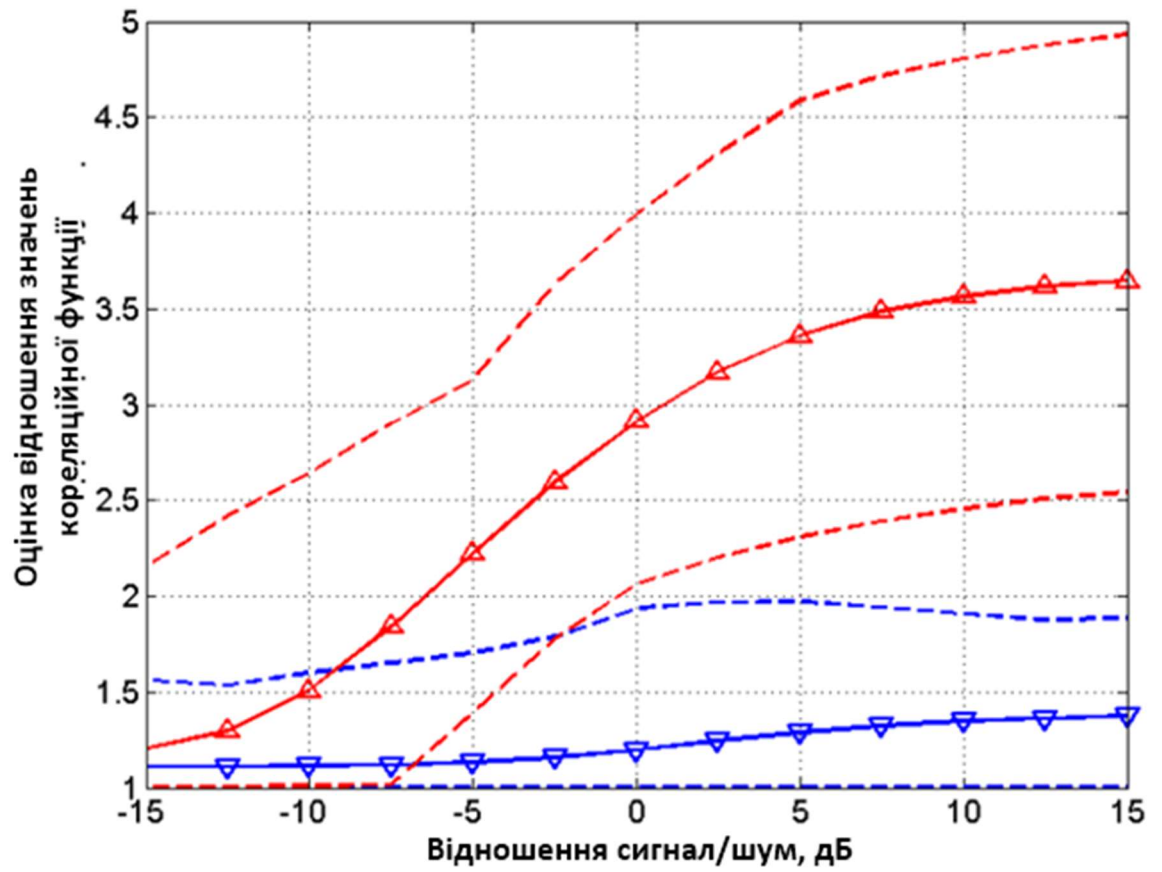


Рисунок А.1 – Залежність оцінки значень кореляційних функцій від співвідношення сигнал/шум сигналу LTE

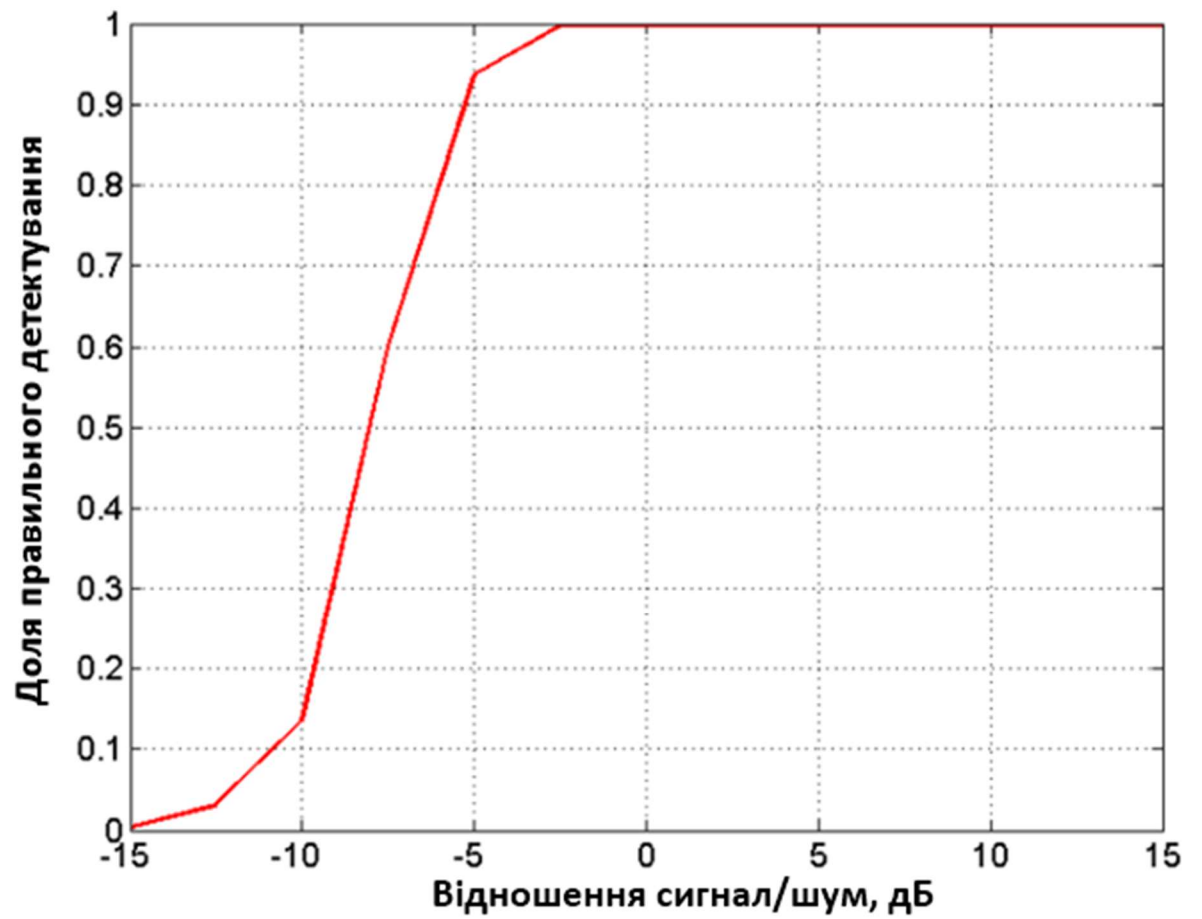
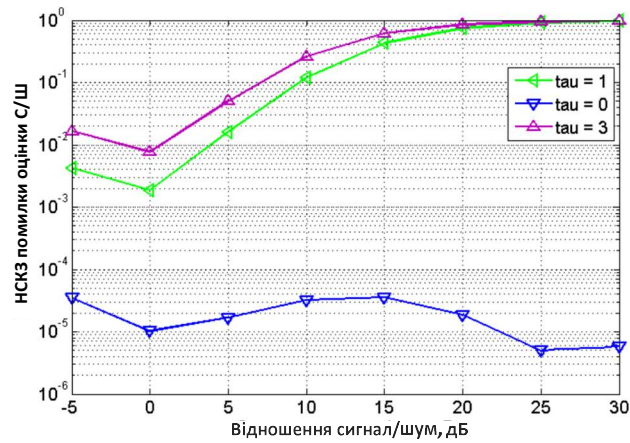
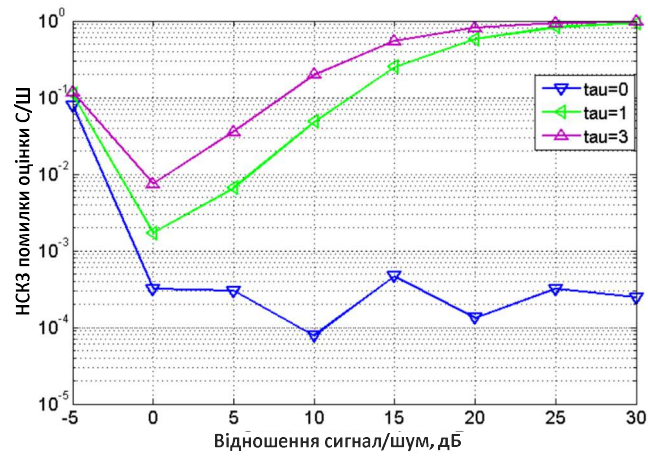


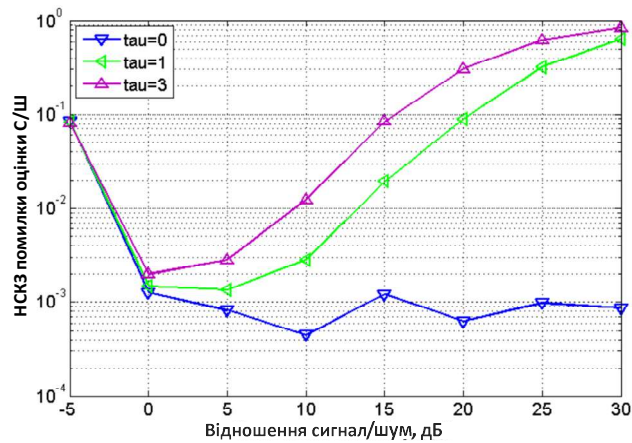
Рисунок А.2 – Залежність точності ідентифікації первинного синхросигналу від співвідношення сигнал/шум сигналу LTE



а)



б)



в)

Рисунок А.3 – Залежність НСКЗ помилки оцінки С/Ш від поточного відношення С/Ш при ідеальній та неідеальній синхронізації для смуг сигналу
а) 1,4 МГц; б) 5 МГц; в) 20 МГц

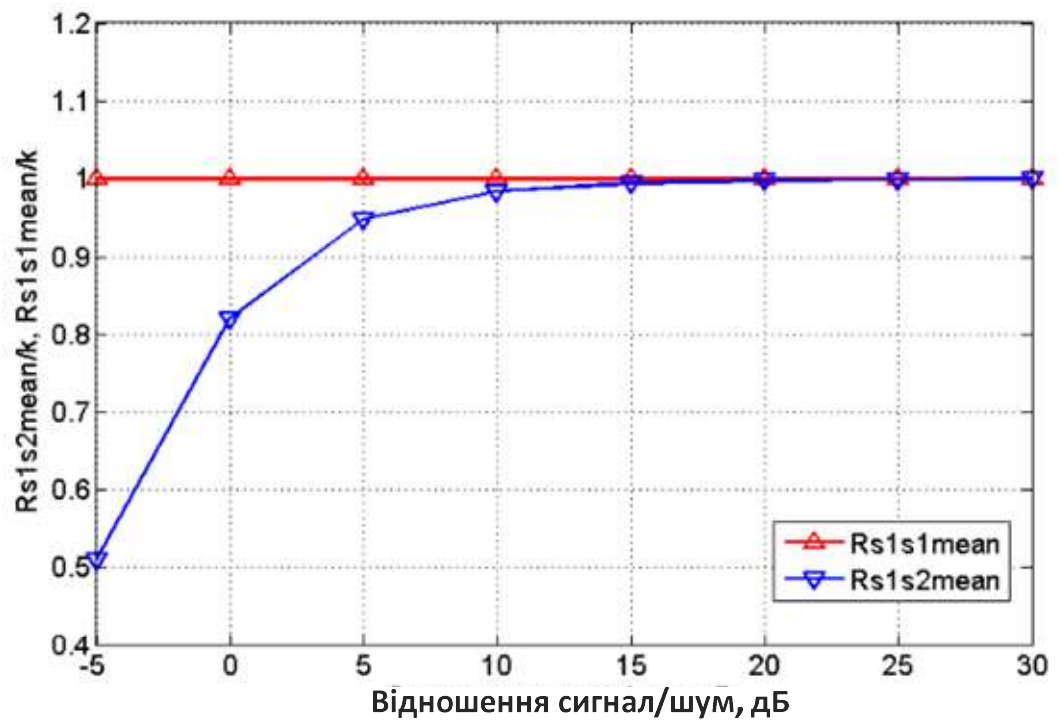


Рисунок А.4 – Залежність нормованих значень кореляційних функцій від поточного відношення сигнал/шум сигналу LTE

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Оцінка параметрів сигналу стандарту LTE

Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота
(БДР, МКР)

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

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність 94,47% Схожість 5,53%

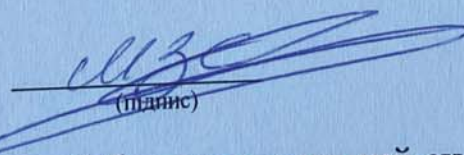
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

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

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

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

Особа відповідальна за перевірку


(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

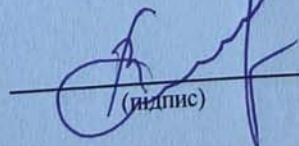
Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Черкес Є.В.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Воловик А.Ю.
(прізвище, ініціали)