

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Навчально-науковий інститут економіки, управління, права та
інформаційних технологій
Кафедра інформаційних систем та технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти бакалавр

на тему: **«Моделювання стандартів 5G-мереж в середовищі MATLAB для
інформаційних систем»**

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньою програмою
Інформаційні управляючі системи
спеціальності 126 Інформаційні системи
та технології
ступеня вищої освіти бакалавр
групи 126ІСТ_бд_2022
Дашівський В'ячеслав Іванович
Керівник: Панасенко Наталія Леонідівна
Рецензент: Муравльов Володимир
Вячеславович

Полтава – 2026 року

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Навчально-науковий інститут економіки, управління, права та
інформаційних технологій
Кафедра інформаційних систем та технологій

Освітня програма Інформаційні управляючі системи
Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ **Юрій УТКІН**
«10» червня 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Дашівському В'ячеславу Івановичу

1. Тема роботи:
«Моделювання стандартів 5G-мереж в середовищі MATLAB для інформаційних систем»,
керівник роботи к.е.н., доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Панасенко Наталія Леонідівна.
Затверджено наказом закладу вищої освіти від «10» квітня 2026 року № 383 ст.
2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи «08» червня 2026 року.
3. Вихідні дані до роботи: специфікації 3GPP (TS 38.211, TR 38.901, TR 38.913), стандарти ITU IMT-2020, дані офіційних сайтів <https://www.mathworks.com/> (MATLAB, Communications Toolbox, Phased Array System Toolbox), <https://www.3gpp.org/> (специфікації 5G NR), <https://www.itu.int/> (стандарти IMT-2020), нормативні документи НКЕК щодо розподілу радіочастотного спектру України, середовище прикладних програм MATLAB R2023b та пізніших версій.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Розділ 1. Теоретичні основи стандартів 5G-мереж та їх застосування в інформаційних системах
Розділ 2. Математичні моделі та методи моделювання 5G-мереж
Розділ 3. Розробка та дослідження моделі 5G-мережі в MATLAB
5. Перелік графічного матеріалу: схеми, рисунки, графіки, діаграми за темою та об'єктом дослідження.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання отримав
Оцінювання економічної ефективності результатів дослідження	Дивнич О. Д., к. е. н., доцент, доцент кафедри економіки та публічного управління	01.04.2026 р.	29.05.2026 р.

7. Дата видачі завдання «10» червня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Вибір і затвердження теми роботи	02.06.2025 р. – 04.06.2025	
2	Складання і затвердження розгорнутого плану та завдання на кваліфікаційну роботу	05.06.2025 р. – 10.06.2025 р.	
3	Опрацювання джерел інформації	11.06.2025 р. – 15.06.2025 р.	
4	Збір, вивчення і обробка інформації, необхідної для виконання роботи	16.06.2025 р. – 20.06.2025 р.	
5	Виконання теоретико-методологічного розділу роботи	08.09.2025 р. – 01.11.2025 р.	
6	Виконання дослідницько-аналітичного розділу роботи	19.01.2026 р. – 14.02.2026 р.	
7	Виконання проєктно-рекомендаційного розділу роботи	16.02.2026 р. – 31.03.2026 р.	
8	Оцінювання економічної ефективності результатів дослідження	01.04.2026 р. – 29.05.2026 р.	
9	Оформлення тексту роботи	01.06.2026 р. – 06.06.2026р.	
10	Попередній захист роботи на кафедрі	08.06.2026 р.	
11	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень і пропозицій	09.06.2026 р. – 10.06.2026 р.	
12	Нормоконтроль	11.06.2026 р. – 15.06.2026 р.	
13	Захист кваліфікаційної роботи	16.06.2026 р. - 18.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти

В'ячеслав ДАШІВСЬКИЙ

Керівник роботи

Наталія ПАНАСЕНКО

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТАНДАРТІВ 5G-МЕРЕЖ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	9
1.1 Еволюція стандартів мобільного зв'язку від 1G до 5G	9
1.2 Архітектура та ключові технології стандарту 5G NR.....	12
1.3 Вимоги та сценарії використання 5G в інформаційних системах України	15
1.4 Порівняльний аналіз параметрів 5G-мереж та вимоги до їх математичного моделювання.....	18
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ 5G- МЕРЕЖ.....	23
2.1 Математичні моделі канального рівня 5G NR	23
2.2 Моделі розповсюдження радіосигналу для діапазонів FR1 та FR2.....	26
2.3 Засоби MATLAB для моделювання систем мобільного зв'язку	29
2.4 Алгоритм побудови імітаційної моделі ланцюга передачі даних 5G NR.....	32
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ 5G-МЕРЕЖІ В MATLAB	36
3.1 Реалізація моделі ланцюга передачі даних стандарту 5G NR в MATLAB	36
3.2 Дослідження характеристик моделі для типових умов	40
3.3 Техніко-економічне обґрунтування ефективності розробленої системи	44
ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	50
ДОДАТКИ.....	54

ВСТУП

Актуальність. Розвиток мобільних телекомунікацій п'ятого покоління є одним із ключових технологічних пріоритетів як на глобальному рівні, так і в Україні зокрема. За даними ITU, кількість підключень до мереж 5G у світі у 2024 році перевищила 1,9 млрд, а до 2030 року прогнозується охоплення понад 5 млрд абонентів [1, 5]. Стандарт 5G NR, визначений організацією 3GPP у специфікаціях Release 15/16, принципово відрізняється від попередніх поколінь застосуванням технологій Massive MIMO, адаптивного beamforming та гнучкої нумерології OFDM, які забезпечують пікову пропускну здатність до 20 Гбіт/с та затримку менше 1 мс [2, 6]. В Україні у листопаді 2024 року НКРЕ провела аукціон на частоти у діапазонах 2100, 2300 та 2600 МГц, за результатами якого три провідних оператори отримали ліцензії на 15 років, що є практичним кроком до комерційного запуску 5G [3, 15]. За таких умов моделювання параметрів 5G-мереж набуває особливої актуальності – воно дозволяє дослідити характеристики систем до фізичного розгортання інфраструктури та підготувати фахівців до роботи з технологіями наступного покоління.

Незважаючи на значний теоретичний доробок у сфері 5G NR, практичні імітаційні моделі, адаптовані до умов українського частотного планування та доступні для використання у навчальному та дослідницькому процесі, залишаються обмеженим ресурсом. Існуючі комерційні рішення для моделювання фізичного рівня 5G, зокрема Keysight SystemVue та Remcom Wireless InSite, є фінансово недоступними для більшості вітчизняних університетів, тоді як відкриті симулятори рівня ns-3 та OMNeT++ не забезпечують повноцінної підтримки beamforming і стандартно-сумісних алгоритмів оцінки BER [4, 26]. Це обумовлює потребу у розробці доступної імітаційної моделі на базі середовища MATLAB, яка б відтворювала ключові механізми фізичного рівня 5G NR і дозволяла кількісно оцінювати вплив параметрів beamforming на якість зв'язку в типових умовах розгортання мереж в Україні.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка та дослідження імітаційної моделі системи MISO-OFDM з адаптивним beamforming у середовищі MATLAB для оцінки характеристик фізичного рівня 5G-мереж в інформаційних системах України.

Відповідно до мети роботи необхідно вирішити наступні завдання:

1. Дослідити еволюцію стандартів мобільного зв'язку, архітектуру 5G NR та стан розгортання мереж п'ятого покоління в Україні;
2. Розглянути математичні моделі канального рівня 5G NR, моделі розповсюдження радіосигналу для діапазонів FR1 та FR2, а також обґрунтувати вибір MATLAB як інструменту моделювання;
3. Розробити імітаційну модель ланцюга передачі даних MISO-OFDM з beamforming у середовищі MATLAB, провести дослідження її характеристик для типових умов України та виконати техніко-економічне обґрунтування ефективності розробки.

Об'єкт дослідження – процеси передачі даних у низхідному каналі MISO-OFDM систем мобільного зв'язку стандарту 5G NR з адаптивним beamforming.

Предмет дослідження – імітаційна модель ланцюга передачі даних фізичного рівня системи MISO-OFDM з beamforming у середовищі MATLAB та характеристики її роботи в умовах частотних діапазонів, виділених для 5G в Україні.

Методи досліджень – дослідження базуються на методах імітаційного моделювання фізичного рівня систем мобільного зв'язку, теорії антенних решіток та beamforming, методах оцінки якості каналу (BER, SIR), а також на положеннях стандартів 3GPP Release 15/16 щодо фізичного рівня 5G NR та моделей розповсюдження радіосигналу (3GPP TR 38.901). Для техніко-економічного обґрунтування застосовуються методи оцінки ефективності IT-проектів (ROI, TCO).

Інформаційна база – специфікації 3GPP (TS 38.211, TS 38.213, TR 38.901, TR 38.913), стандарти ITU IMT-2020, наукові статті та монографії з теорії Massive MIMO і beamforming, документація MathWorks щодо Communications

Toolbox та Phased Array System Toolbox, нормативні документи щодо розподілу радіочастотного спектру в Україні, а також статистичні дані щодо стану розгортання 5G-мереж.

Практична значущість – розроблена імітаційна модель забезпечує кількісну оцінку ефективності beamforming у системах MISO-OFDM для частотних діапазонів FR1. Модель реалізована з параметричним інтерфейсом конфігурації через JSON-файл та автоматичним збереженням результатів, що спрощує її використання у навчальному процесі за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології» та у прикладних дослідженнях з підготовки до розгортання 5G-інфраструктури.

Результати роботи апробовані в рамках наукової конференції здобувачів вищої освіти за результатами науково-дослідної роботи у 2025-2026 рр.

Структура кваліфікаційної роботи логічно пов'язана з задачами досліджень і містить перелік умовних позначень, вступ, три розділи основної частини, висновки, список використаних джерел. Загальний обсяг текстової частини кваліфікаційної роботи складає 53 сторінки формату А4. Вона містить 13 рисунків і 15 таблиць.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТАНДАРТІВ 5G-МЕРЕЖ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Еволюція стандартів мобільного зв'язку від 1G до 5G

Розвиток мобільних телекомунікацій є одним із найдинамічніших технологічних процесів кінця XX – початку XXI століття. За кілька десятиліть галузь пройшла шлях від аналогових голосових мереж першого покоління до інтелектуальних широкосмугових систем, здатних обслуговувати мільярди одночасних підключень. Кожне нове покоління не просто збільшувало швидкість передачі даних, а формувало якісно нову технологічну парадигму [1].

Перше покоління мобільного зв'язку (1G) з'явилося у 1970-80х роках і функціонувало на основі аналогової передачі сигналу. Тогочасні стандарти – NMT (Nordic Mobile Telephone), AMPS (Advanced Mobile Phone System) та TACS (Total Access Communication System) – забезпечували виключно голосовий зв'язок. Швидкість передачі даних не перевищувала 1,9 кбіт/с, тоді як вартість обладнання й тарифи робили ці мережі недоступними для широкої аудиторії [2].

Перехід до другого покоління (2G), що відбувся на початку 1990-х, ознаменував впровадження цифрових технологій. Стандарти GSM (Global System for Mobile Communications) у Європі та D-AMPS у США забезпечили більш ефективне використання спектру, підтримку SMS та шифрування трафіку. Протоколи розширення 2G – GPRS (2,5G) та EDGE (2,75G) – підняли швидкість передачі даних до 53,6 і 384 кбіт/с відповідно [3]. Стандарт GSM став основою глобального роумінгу і до сьогодні використовується для підтримки голосового зв'язку в Україні.

Третє покоління (3G), запроваджене у 2000-х роках на базі стандартів UMTS та CDMA2000, принципово змінило характер мобільного зв'язку, додавши повноцінний доступ до інтернету. Технологія HSPA, що є еволюцією UMTS,

дозволила досягти теоретичних швидкостей завантаження до 42,2 Мбіт/с. Саме з 3G розпочався активний розвиток мобільних застосунків, онлайн-банкінгу та мультимедійних сервісів [3].

Четверте покоління (4G/LTE) вивело мобільні мережі на рівень, порівнянний із провідним широкосмуговим зв'язком. Пікові швидкості завантаження можуть сягати 700 Мбіт/с, а затримка суттєво знизилась порівняно з 3G. Ключові технології 4G – OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), MIMO (Multiple Input Multiple Output) та адаптивна модуляція – закладуть фундамент, на якому буде побудовано 5G. В Україні технологія 4G LTE є домінуючим стандартом і станом на 2024 рік охоплює більшість населених пунктів та транспортної інфраструктури [4]. Порівняльні характеристики поколінь мобільного зв'язку наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика поколінь мобільного зв'язку

Покоління	Роки впров.	Технологія	Пікова швидкість	Затримка	Ключові послуги
1G	1980-ті	AMPS, NMT	~1,9 кбіт/с	>500 мс	Голосовий зв'язок
2G	1992	GSM, CDMA	до 384 кбіт/с	~300 мс	SMS, голос, GPRS
3G	2000-ті	UMTS, HSPA	до 42 Мбіт/с	~100 мс	Інтернет, відео
4G	2010-ті	LTE, WiMAX	до 700 Мбіт/с	~50 мс	Потокові медіа
5G	з 2019	NR (3GPP)	до 20 Гбіт/с	<5 мс	IoT, AR/VR, M2M

П'яте покоління (5G) офіційно визначене міжнародним стандартом IMT-2020, прийнятим ITU (Міжнародним союзом електрозв'язку) у 2020 році. Стандартизацію радіоінтерфейсу здійснює організація 3GPP через серію специфікацій, починаючи з Release 15 (2018) та Release 16 (2020) [5]. Відповідно до 3GPP TR 38.913, мережі 5G повинні забезпечувати пікову швидкість завантаження 20 Гбіт/с, затримку менше 1 мс в режимі URLLC та густину підключень до 10^6 пристроїв на км² [6].

Ключовою математичною характеристикою спектральної ефективності 5G є залежність пропускної здатності від ширини смуги та схеми модуляції, яку можна виразити через формулу Шеннона:

$$C = B \cdot \log_2(1 + \text{SNR}), \quad (1.1)$$

де C – пропускна здатність каналу (біт/с),

B – ширина смуги частот (Гц),

SNR – відношення сигнал/шум.

Саме ця залежність пояснює, чому 5G розширює смугу до сотень МГц у діапазоні FR1 (450 МГц – 6 ГГц) і навіть до ГГц у міліметровому діапазоні FR2 [5]. Структурну схему еволюції стандартів мобільного зв'язку ілюструє рисунок 1.1.



Рисунок 1.1 – Еволюція поколінь мобільного зв'язку від 1G до 5G

Стандарт 5G New Radio (NR) передбачає два базових сценарії розгортання: NSA (Non-Standalone) – з опорою на наявну інфраструктуру 4G LTE, та SA (Standalone) – із повністю автономною архітектурою 5G Core. Перший варіант є перехідним і спрощує міграцію операторів, тоді як другий відкриває повний

функціонал технології, зокрема мережеве нарізання (Network Slicing) та підтримку масового IoT [7].

В Україні 5G перебуває на стадії пілотного розгортання. У 2024 році Міністерство цифрової трансформації оголосило про пілотний запуск, а у 2026 році першим відкритим 5G-простором у державному університеті стало підтвердження поступового входу технології в публічну сферу [7]. Дослідження і моделювання параметрів 5G-мереж є, таким чином, своєчасним і практично важливим завданням для підготовки вітчизняної телекомунікаційної інфраструктури до повноцінного розгортання нового стандарту.

1.2 Архітектура та ключові технології стандарту 5G NR

Стандарт 5G New Radio (NR), розроблений консорціумом 3GPP у рамках специфікацій Release 15 та Release 16, передбачає принципово нову системну архітектуру, що поєднує вдосконалену мережу радіодоступу (NG-RAN) із повністю переробленим ядром мережі (5G Core, 5GC) [8]. На відміну від попередніх поколінь, де функції управління і передачі даних були тісно пов'язані в апаратному обладнанні, 5G NR реалізує чітке розділення площини управління (Control Plane, CP) і площини даних (User Plane, UP), що суттєво підвищує гнучкість та масштабованість мережі [9].

Ключовим елементом радіодоступу є базова станція 5G – gNodeB (gNB). Вона забезпечує роботу фізичного та канального рівнів і може підтримувати смугу до 100 МГц у піддіапазоні FR1 (450 МГц – 6 ГГц) і до 400 МГц у міліметровому діапазоні FR2 (24,25 – 52,6 ГГц) [8]. Архітектурно gNB може бути розділено на централізований вузол (gNB-CU) та один або кілька розподілених вузлів (gNB-DU), з'єднаних інтерфейсом F1. Таке розщеплення дозволяє гнучко розгорнути мережу та централізовано обробляти частину функцій.

Ядро мережі 5GC побудоване на принципах сервіс-орієнтованої архітектури (Service Based Architecture, SBA), де мережеві функції взаємодіють через стандартизовані API. Основними функціональними вузлами є: AMF (Access and Mobility Management Function) – відповідає за реєстрацію пристроїв, автентифікацію та управління мобільністю; SMF (Session Management Function) – керує встановленням і підтримкою сесій передачі даних; UPF (User Plane Function) – обробляє пакети користувацького трафіку, виконує маршрутизацію та застосовує правила QoS; PCF (Policy Control Function) – централізовано управляє мережевими політиками [9]. Така модульність дозволяє незалежно масштабувати окремі функції залежно від навантаження. Узагальнену структуру архітектури 5G NR наведено на рисунку 1.2.

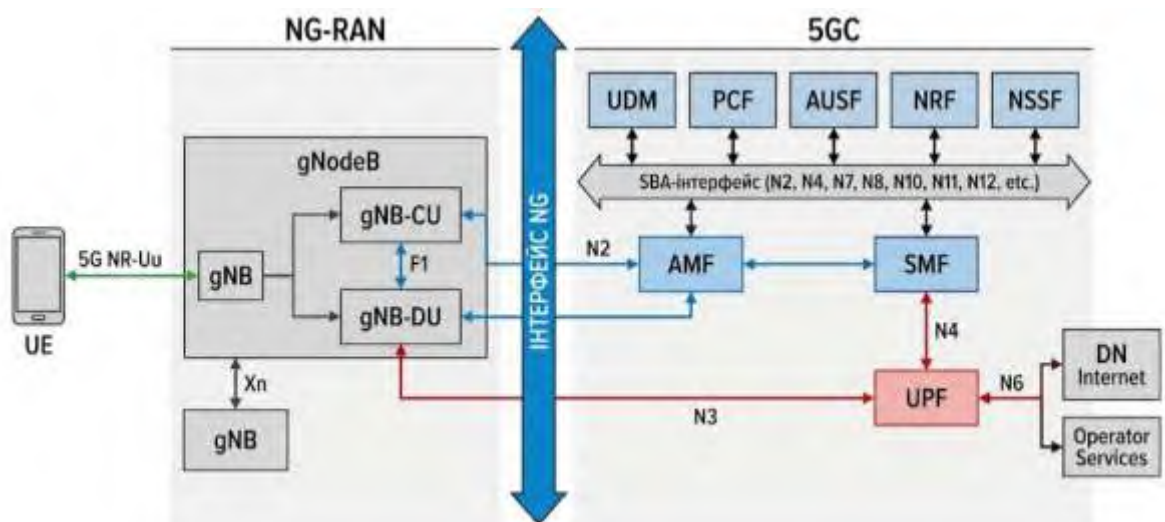


Рисунок 1.2 – Архітектура системи 5G NR: NG-RAN та ядро мережі 5GC

На фізичному рівні 5G NR використовує модуляцію CP-OFDM (Cyclic Prefix Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) як для низхідного (Downlink), так і для висхідного (Uplink) каналу. Визначальною особливістю NR є гнучка «нумерологія» – набір параметрів субнесучих частот, що визначається індексом μ :

$$\Delta f = 2^{\mu} \times 15 \text{ кГц}, \quad \mu \in \{0,1,2,3,4\}, \quad (1.2)$$

де Δf – крок між субнесучими частотами.

При $\mu = 0$ крок становить 15 кГц (як у LTE), при $\mu = 3$ –120 кГц (для FR2). Це дозволяє адаптувати параметри передачі до різних сценаріїв: чим вищий μ , тим коротший часовий слот і менша затримка [10].

Серед ключових радіотехнологій 5G NR особливе місце займає Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output). Базові станції з масивними антенними решітками (до 256 і більше елементів) формують вузькоспрямовані пучки сигналу (beamforming), що одночасно підвищують рівень прийнятого сигналу і зменшують взаємні завади між користувачами. Завдяки просторовому мультиплексуванню (Spatial Multiplexing) одна базова станція може одночасно обслуговувати кілька незалежних потоків даних, суттєво збільшуючи спектральну ефективність мережі [10]. Порівняльні характеристики ключових технологій 5G NR наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Ключові технології 5G NR та їх характеристики

Технологія	Призначення	Основні параметри
CP-OFDM	Модуляція фізичного рівня	Крок субнесучих 15–240 кГц ($\mu = 0..4$)
Massive MIMO	Підвищення ємності та покриття	До 256+ антенних елементів, до 32 шарів
Beamforming	Спрямована передача сигналу	Цифрове/аналогове/гібридне формування пучка
LDPC / Polar Codes	Канальне кодування	LDPC – для даних, Polar – для управління
Network Slicing	Логічна сегментація мережі	Незалежні наскрізні мережеві зрізи (slices)
NSA / SA	Режими розгортання	NSA – на базі 4G LTE; SA – повністю 5G

Важливою архітектурною концепцією 5G є мережеве нарізання (Network Slicing) – створення кількох незалежних логічних мереж поверх єдиної фізичної інфраструктури. Кожен мережевий зріз (slice) конфігурується відповідно до вимог конкретного сценарію: eMBB (Enhanced Mobile Broadband) – для передачі великих обсягів даних з максимальною пропускнуою здатністю, URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) – для систем, критичних до затримки, та

mMTC (Massive Machine-Type Communications) – для масового підключення IoT-пристроїв [11]. Реалізація Network Slicing стає можливою завдяки технологіям SDN (Software-Defined Networking) та NFV (Network Functions Virtualization), які відокремлюють функції управління мережею від фізичного обладнання [12].

Два режими розгортання – NSA (Non-Standalone) та SA (Standalone) – визначають шлях переходу операторів до 5G. У режимі NSA нова радіодоступна мережа 5G NR спирається на наявне ядро 4G LTE, що спрощує і здешевлює початковий запуск. Режим SA передбачає повністю незалежне ядро 5GC і відкриває доступ до всього функціоналу стандарту – зокрема, до мережевого нарізання, гнучкого управління якістю обслуговування та підтримки надійного зв'язку з наднизькою затримкою [11]. Відповідно до даних Національного інституту стратегічних досліджень, попит на розгортання приватних мереж на базі 5G NR SA в Україні активно зростає, що робить всебічне дослідження і моделювання параметрів цього стандарту вкрай актуальним завданням.

1.3 Вимоги та сценарії використання 5G в інформаційних системах України

Розгортання мереж 5G в Україні відбувається в складних умовах, що визначаються одночасно воєнним станом, нагальними потребами цифрової трансформації та зобов'язаннями у рамках євроінтеграції. Попри це, вітчизняний телекомунікаційний ринок стабільно рухається до впровадження нового стандарту: у 2023 році набрав чинності оновлений план розподілу і користування радіочастотним спектром (постанова КМУ № 1340 від 19.12.2023), який привів українське законодавство у відповідність із вимогами ЄС і відкрив можливості для підготовки до 5G [14].

Регуляторна база галузі формується Національною комісією, що здійснює державне регулювання у сферах електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку (НКЕК). У листопаді 2024 року НКЕК провела аукціон на частоти у діапазонах 2100, 2300 та 2600 МГц, за результатами якого три провідних оператори – «Київстар», Vodafone Україна та

lifecell – отримали ліцензії терміном на 15 років, сплативши до державного бюджету понад 2,9 млрд грн [15]. Водночас Кабінет Міністрів затвердив план підготовки до пілотного запуску 5G у трьох містах: Львові, Києві та Одесі [16].

У технічному плані для України визначено два ключових діапазони розгортання 5G: 700 МГц для забезпечення широкого покриття (особливо в сільській місцевості та малих містах) та 3500 МГц для забезпечення максимальної пропускної здатності і підтримки dense-зон із великою кількістю пристроїв [16]. Перший діапазон відноситься до смуги FR1 і дозволяє поширювати сигнал на значні відстані з хорошою здатністю проникнення у будівлі, тоді як 3500 МГц забезпечує смугу каналу до 100 МГц, необхідну для досягнення пікових швидкостей передачі даних. Взаємодоповнюваність цих діапазонів ілюструється рисунком 1.3.

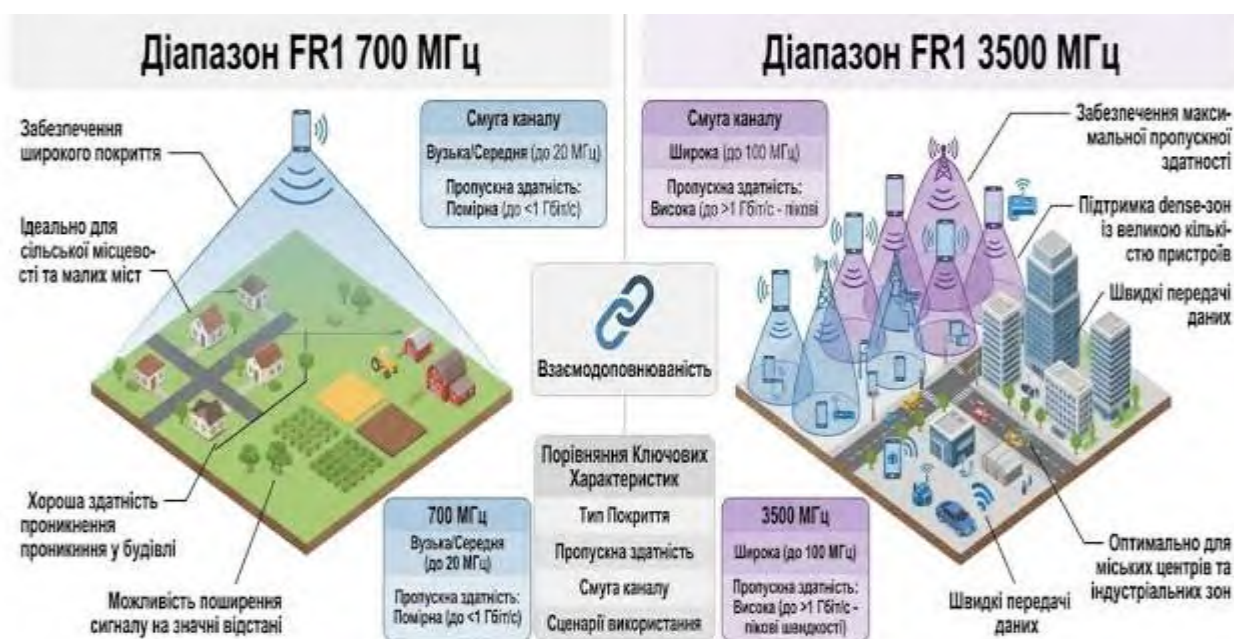


Рисунок 1.3 – Частотне планування 5G NR для України: діапазони FR1 700 МГц та 3500 МГц

Сценарії використання 5G в інформаційних системах України охоплюють три базових класи, визначені стандартом 3GPP (таблиця 1.3). Перший – eMBB (Enhanced Mobile Broadband) – спрямований на забезпечення надвисоких швидкостей завантаження і вивантаження даних для мультимедійних застосунків, потокового відео 4K/8K, AR/VR, хмарних ігор та відеоконференцій.

Таблиця 1.3 – Сценарії використання 5G в інформаційних системах України

Сценарій	Клас 3GPP	Ключові показники	Типові застосунки в Україні
Широкопasmовий доступ	eMBB	До 20 Гбіт/с, покриття	Відеозв'язок, хмарні сервіси, AR/VR
Надійний зв'язок з низьк. затр.	URLLC	<1 мс, 99,9999% надійн.	Телемедицина, управління БПЛА
Масовий IoT	mMTC	10 ⁶ пристр./км ² , ~10 р. АКБ	Смарт-лічильники, агро-IoT
Приватні мережі	Network Slicing	Ізольований зріз спектру	Промзони, логістика, енергетика

Очікувана пікова пропускна здатність у режимі eMBB в мережах з Massive MIMO у діапазоні 3500 МГц може бути оцінена за формулою [17]:

$$C_{\text{eMBB}} = N_{\text{layers}} \cdot B \cdot \eta_s \cdot (1 - \alpha_{\text{OH}}), \quad (1.3)$$

де N_{layers} – кількість просторових шарів MIMO,

B – смуга частот (Гц),

η_s – спектральна ефективність (біт/с/Гц),

α_{OH} – частка накладних витрат (overhead).

При $N_{\text{layers}} = 8$, $B = 100$ МГц та $\eta_s = 7,5$ біт/с/Гц теоретична пропускна здатність сягає понад 6 Гбіт/с.

Другий сценарій – URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications) – є критично важливим для промислових систем керування, телемедицини, автономного транспорту та систем типу «розумне місто». Ключові показники: затримка менше 1 мс і надійність з'єднання 99,9999%. В умовах України перспективним застосуванням URLLC є дистанційне управління об'єктами інфраструктури, координація безпілотних систем і робота розподілених промислових систем автоматизації.

Третій сценарій – mMTC (Massive Machine-Type Communications) – забезпечує підключення до мільйона пристроїв на квадратний кілометр і є базою для масштабних IoT-систем. За даними Київстар, у 2024-2025 роках проводились

тестування технологій 5G у напрямках Starlink Direct to Cell та хмарної інфраструктури, що свідчить про практичний попит на нові сценарії підключення [18].

Практичне впровадження 5G в Україні стикається з низкою викликів. По-перше, діапазон 3500 МГц частково зайнятий військовими системами, тому повноцінне комерційне розгортання можливе лише після закінчення воєнного стану [16]. По-друге, мережі 5G є значно більш енергоємними, ніж 4G, що є критичним в умовах блекаутів. За статистикою, підсистема радіодоступу (RAN) споживає до 70-80% загальної електроенергії об'єкта 5G [17]. Для вирішення цих проблем оператори активно впроваджують резервне живлення: lifecell повідомляє, що станом на грудень 2025 року 94% їх базових станцій здатні працювати до 10 годин без електроенергії [19]. По-третє, значних інвестицій потребує модернізація існуючої транспортної та оптичної інфраструктури, яка є необхідною умовою для підтримки фронтхолу та бекхолу гнучкої архітектури 5G NR.

Таким чином, Україна формує необхідну нормативну та інфраструктурну базу для повноцінного розгортання 5G. Моделювання параметрів 5G-мереж з урахуванням вітчизняних умов – типових частотних діапазонів, сценаріїв навантаження та вимог до якості обслуговування – є необхідним кроком для підготовки фахівців і проєктувальників до роботи з технологіями наступного покоління.

1.4 Порівняльний аналіз параметрів 5G-мереж та вимоги до їх математичного моделювання

Оцінювання ефективності мереж 5G NR спирається на систему кількісних показників якості обслуговування (QoS), що безпосередньо пов'язані з вимогами трьох базових сценаріїв використання. Вимірювання та аналіз цих показників є обов'язковою умовою як для верифікації відповідності мережі стандарту, так і

для обґрунтування проєктних рішень при розгортанні інфраструктури. Регуляторна база України також передбачає обов'язковий моніторинг параметрів якості в мережах, що функціонують за стандартами LTE та 5G NR [20].

Ключовими показниками ефективності (KPI) на рівні фізичного і канального рівнів є коефіцієнт бітових помилок (BER, Bit Error Rate), коефіцієнт блокових помилок (BLER, Block Error Rate) та пропускна здатність (Throughput). BER відображає частку некоректно прийнятих бітів до загального числа переданих і є первинним показником якості каналу. BLER, що є більш безпосередньо пов'язаним із транспортними блоками (TB) протоколу 5G NR, показує частку блоків, що не пройшли перевірку CRC. Саме BLER є цільовим показником при проєктуванні схем адаптивної модуляції та кодування (AMC): для каналу PDSCH у режимі eMBB нормативне цільове значення BLER становить 10^{-1} для початкової передачі та 10^{-6} для режиму URLLC [21]. Залежність BER від відношення сигнал/шум (SNR) є основною характеристичною кривою системи зв'язку і може бути теоретично оцінена для кожної схеми модуляції. Для випадку M-QAM у каналі AWGN ймовірність бітової помилки наближено визначається як:

$$P_b \approx \frac{4}{\log_2 M} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1} \cdot \frac{E_b}{N_0}} \right), \quad (1.4)$$

де M – порядок сузір'я,

E_b/N_0 – відношення енергії біта до спектральної щільності шуму,

$Q(\cdot)$ – Q-функція.

Ця залежність пояснює, чому перехід від QPSK до 256-QAM потребує значно вищого SNR для досягнення однакового BER [22]. На рівні мережевої продуктивності ключовими параметрами є затримка (Latency), джитер та спектральна ефективність. Затримка у мережах 5G може становити менше 5 мілісекунд, що у порівнянні з 50-200 мс у мережах 4G дозволяє реалізовувати застосунки в реальному часі. Для сценарію URLLC ці вимоги є ще жорсткішими:

наскрізна затримка не повинна перевищувати 1 мс. Спектральна ефективність (SE, біт/с/Гц) характеризує ефективність використання виділеної смуги частот і є інтегральним показником, що поєднує вплив схеми модуляції, кодового відношення та конфігурації MIMO. Відповідно до вимог IMT-2020, пікова спектральна ефективність 5G NR у низхідному каналі повинна становити не менше 30 біт/с/Гц [21].

Таблиця 1.4 – Ключові показники ефективності 5G NR за сценаріями використання (3GPP TR 38.913)

Показник	eMBB	URLLC	mMTC
Пікова пропускна здатність (DL)	20 Гбіт/с	–	–
Наскрізна затримка	~10 мс	< 1 мс	–
Надійність з'єднання	> 99%	99,9999%	> 99,9%
Пікова спект. ефективність (DL)	30 біт/с/Гц	–	–
Густота підключень	–	–	10 ⁶ пристр./км ²
Цільовий BLER (PDSCH)	10 ⁻¹	10 ⁻⁵ – 10 ⁻⁶	–

Для оцінки перелічених показників застосовують два принципово різних підходи: натурні вимірювання (Drive Test, активне та пасивне тестування мережі) та імітаційне моделювання. Натурні вимірювання дозволяють отримати реальні дані функціонуючих мереж, проте вимагають наявності розгорнутої інфраструктури, значних матеріальних витрат і не забезпечують можливості систематичного контролю параметрів середовища. Імітаційне моделювання позбавлене цих недоліків: воно дозволяє дослідити будь-яку комбінацію параметрів (схеми модуляції, ширину смуги, умови каналу) до фізичного розгортання мережі [23].

Серед програмних середовищ для імітаційного моделювання 5G найбільш вживаними є MATLAB з 5G Toolbox, ns-3 та OMNeT++ з розширенням Simu5G. Пакет ns-3 є відкритим кросплатформним симулятором мережевого рівня, що добре підходить для моделювання мережевих протоколів і системного рівня; проте його підтримка фізичного рівня 5G NR є відносно обмеженою порівняно зі спеціалізованими інструментами. OMNeT++ разом із Simu5G забезпечує

моделювання площини даних 5G NR, однак зосереджений переважно на системному, а не на фізичному рівні та не підтримує пряме обчислення BER/BLER за специфікаціями 3GPP [26]. MATLAB з 5G Toolbox, своєю чергою, надає інженерам стандарт-сумісні алгоритми та референсні конструкції для моделювання, симуляції та верифікації систем зв'язку 5G. Серед ключових переваг MATLAB для дослідження фізичного рівня – підтримка специфікацій 3GPP Release 15/16, вбудовані функції формування сигналів PDSCH/PUSCH, CDL/TDL-канальних моделей, а також зручний графічний інструментарій для аналізу залежностей BER і BLER [24]. Середовище дозволяє аналізувати такі показники, як пропускна здатність, коефіцієнт блокових помилок та спектральна ефективність у різних сценаріях навантаження і розгортання. Порівняльну характеристику основних середовищ моделювання наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняльна характеристика середовищ моделювання 5G-мереж

Критерій	MATLAB 5G Toolbox	ns-3	OMNeT++ / Simu5G
Ліцензія	Комерційна	Open-source	Open-source
Рівень моделювання	Фізичний + канальний	Мережевий	Канальний + мережевий
Відповідність 3GPP	Повна (Rel. 15/16)	Часткова	Часткова
Обчислення BER/BLER	Вбудовано	Обмежено	Обмежено
CDL/TDL-моделі каналу	Вбудовано	Відсутній	Відсутній
Інтеграція з Simulink	Так	Ні	Ні

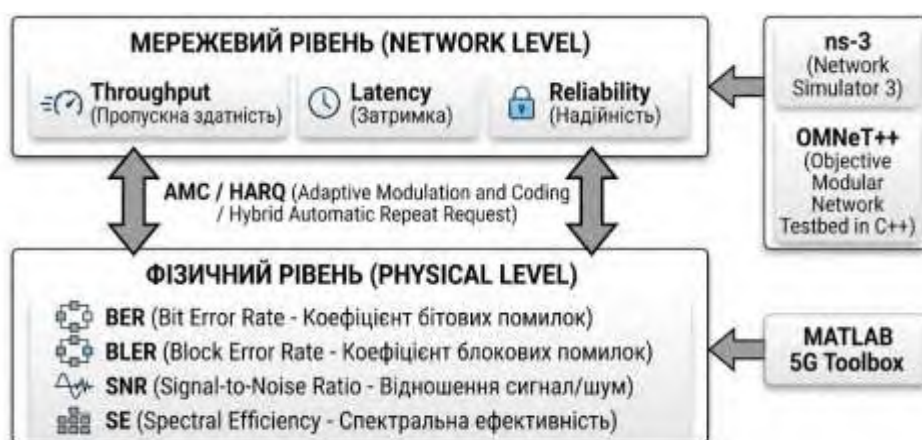


Рисунок 1.4 – Ієрархія показників якості 5G NR та зв'язок між рівнями моделювання

Для комплексного дослідження параметрів фізичного рівня 5G NR – зокрема залежності BER і BLER від SNR, пропускної здатності від ширини смуги та схеми модуляції – середовище MATLAB із пакетом 5G Toolbox є найбільш повним і стандарт-сумісним інструментом. Кількісні критерії, описані у цьому підрозділі, будуть безпосередньо використані при постановці та аналізі результатів імітаційних експериментів.

Таким чином, було розглянуто еволюцію мобільних стандартів від аналогових мереж 1G до 5G NR, досліджено архітектурні компоненти стандарту 5G NR відповідно до специфікацій 3GPP Release 15/16, проаналізовано стан розгортання 5G в Україні та нормативно-правову базу НКЕК, а також систематизовано ключові показники якості (BER, BLER, Throughput, Latency) і обґрунтовано доцільність використання MATLAB 5G Toolbox як основного інструмента для імітаційного моделювання фізичного рівня 5G NR у рамках подальших досліджень.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ 5G-МЕРЕЖ

2.1 Математичні моделі канального рівня 5G NR

Фізичний рівень стандарту 5G NR будується на основі модуляції CP-OFDM (Cyclic Prefix Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) – технології, яка успадкована від 4G LTE, однак значно розширена завдяки введенню гнучкої нумерології та нових схем кодування. Математичний опис ланцюга передачі даних на фізичному рівні охоплює чотири взаємопов'язані складові: формування OFDM-сигналу з циклічним префіксом, схеми модуляції (сузір'я символів), канальне кодування та часово-частотне ресурсне відображення [27].

Базовою операцією формування OFDM-сигналу є зворотне дискретне перетворення Фур'є (IDFT/IFFT) над вектором комплексних символів модуляції. Дискретний OFDM-сигнал на виході передавача для одного символу описується формулою:

$$s[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \cdot e^{j2\pi kn/N}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2.1)$$

де N – загальна кількість піднесучих частот (розмір IFFT),
 $X[k]$ – комплексний символ модуляції на k -й піднесучій,
 n – дискретний часовий індекс.

Після обчислення IFFT до кожного OFDM-символу додається циклічний префікс (CP) – копія $N_c P$ останніх відліків, яка вставляється на початок символу. Тривалість CP має перевищувати максимальне часове розмиття багатопроменевого каналу, оскільки саме це забезпечує ортогональність піднесучих при прийомі та усуває міжсимвольну інтерференцію (ISI) [28]. На

приймачі CP вирізається, після чого виконується пряме FFT для відновлення символів $X[k]$.

Визначальною особливістю 5G NR є масштабована нумерологія – набір конфігурацій часово-частотних параметрів, що визначаються індексом μ . Крок між піднесучими $\Delta f = 2^\mu \times 15$ кГц задає тривалість слота: зі збільшенням μ слот стає коротшим, а затримка – меншою. Стандарт 3GPP визначає п'ять значень μ від 0 до 4, відповідно з кроком 15, 30, 60, 120 та 240 кГц. При цьому кількість слотів у підкадрі (1 мс) дорівнює 2^μ , а кожен слот містить 14 OFDM-символів у нормальному режимі CP [29]. У діапазоні FR1, актуальному для України (700 МГц та 3500 МГц), найчастіше застосовуються $\mu = 0$ та $\mu = 1$, тоді як міліметровий діапазон FR2 використовує $\mu = 3$. Порівняльні параметри нумерологій 5G NR наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри нумерологій 5G NR (3GPP TS 38.211)

μ	Δf , кГц	Тривалість слота, мс	Слотів/підкадр	Застосування
0	15	1	1	FR1, сумісність з LTE
1	30	0,5	2	FR1 (700 МГц, 3500 МГц)
2	60	0,25	4	FR1/FR2
3	120	0,125	8	FR2 (мм-діапазон)
4	240	0,0625	16	FR2 (тільки для опорних сигналів)

Схеми модуляції 5G NR охоплюють QPSK (4-QAM), 16-QAM, 64-QAM та 256-QAM. Вибір конкретної схеми здійснюється адаптивно на основі поточного значення CQI (Channel Quality Indicator), яке абонентський пристрій звітує базовій станції. QPSK кодує 2 біти на символ і є найзавадостійкішою схемою; 256-QAM кодує 8 біт на символ та забезпечує найвищу спектральну ефективність, однак потребує значно вищого відношення сигнал/шум (SNR). Спектральна ефективність окремої піднесучої при модуляції M-QAM та кодовому відношенні R визначається як:

$$\eta = R \cdot \log_2 M \text{ [біт/с/Гц]}, \quad (2.2)$$

де M – порядок сузір'я,

R – кодове відношення.

При 256-QAM і $R = 948/1024 \approx 0,926$ (максимальна схема MCS у 5G NR) спектральна ефективність однієї піднесучої сягає 7,41 біт/с/Гц [27]. Виходячи з параметрів таблиці 2.1 та формули (2.2), пікова пропускна здатність для смуги 100 МГц з $\mu = 1$ може перевищувати 700 Мбіт/с навіть без MIMO.

Канальне кодування у 5G NR реалізовано двома принципово різними схемами. Для каналів передачі даних – фізичного низхідного каналу PDSCH та висхідного PUSCH – застосовуються коди LDPC (Low-Density Parity-Check) з двома базовими графами BG1 та BG2. Граф BG1 призначено для великих транспортних блоків (понад 3824 біти), BG2 – для менших блоків та налаштований на більш низькі кодові відношення, що є важливим для URLLC-сценаріїв [30]. Для каналів управління – PDCCH, UCI на PUCCH – використовуються полярні коди (Polar Codes) з CRC-допоміжним декодуванням за алгоритмом SCL (Successive Cancellation List). Полярні коди теоретично досягають пропускної здатності каналу і демонструють переваги на коротких пакетах, характерних для управляючих каналів. Відповідність каналів та схем кодування наведена у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Схеми кодування каналів фізичного рівня 5G NR

Канал	Тип даних	Схема кодування	Базовий граф / параметри
PDSCH	Низхідні дані	LDPC	BG1 (ТБ > 3824 біт), BG2 (інше)
PUSCH	Висхідні дані	LDPC	BG1 / BG2 залежно від розміру ТБ
PDCCH (DCI)	Управляючий (DL)	Polar Codes	CA-SCL, CRC-24A/CRC-24C
PUCCH (UCI)	Управляючий (UL)	Polar Codes	CA-SCL
PBCH	Широкомовний	Polar Codes	CRC-24C

У стандарті 5G NR також застосовується механізм гібридного повторного запиту (HARQ, Hybrid Automatic Repeat reQuest) з incremental redundancy: якщо отриманий транспортний блок не пройшов перевірку CRC, замість повного перепередачі базова станція надсилає додаткові надлишкові біти, які поєднуються на приймачі для декодування. Завдяки HARQ цільовий початковий BLER 10^{-1} після кількох раундів поєднання знижується до операційно прийняттого рівня менше 10^{-5} [31].

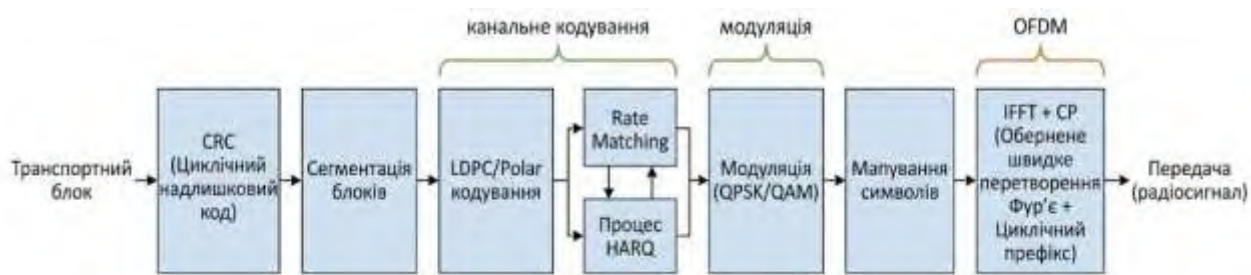


Рисунок 2.1 – Структурна схема ланцюга передачі 5G NR на фізичному рівні

Представлені математичні моделі – від дискретного CP-OFDM сигналу та масштабованої нумерології до схем модуляції та канального кодування LDPC/Polar – утворюють повний опис фізичного рівня 5G NR, на основі якого буде реалізовано імітаційну модель ланцюга передачі в MATLAB.

2.2 Моделі розповсюдження радіосигналу для діапазонів FR1 та FR2

Достовірне моделювання ланцюга передачі 5G NR неможливе без адекватного математичного опису фізичного радіоканалу. Радіоканал визначає, яким чином сигнал, сформований передавачем трансформується на шляху до приймача через ефекти загасання на трасі, тіньового замирання та багатопроменевого поширення. Стандарт 3GPP TR 38.901 визначає уніфіковану систему моделей розповсюдження для діапазонів від 0,5 до 100 ГГц, яка є обов'язковою базою для симуляцій на рівні ланцюга передачі (link-level) та системному рівні [32].

Велике загасання на трасі (large-scale path loss) описує середнє зменшення потужності сигналу із зростанням відстані та залежить від частоти несучої, морфології середовища і наявності прямої видимості між базовою станцією та абонентським пристроєм (умови LOS або NLOS). Для сценарію Urban Macro (UMa), типового для розгортання 5G у великих містах України, модель TR 38.901 для умов LOS описується виразом:

$$PL_{\text{UMa-LOS}} = 32.4 + 20 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c), \quad (2.3)$$

де d_{3D} – тривимірна відстань між базовою станцією та абонентом у метрах,
 f_c – несуча частота у ГГц.

Ця формула діє у діапазоні відстаней від 10 до 5000 м і дає значно оптимістичніший прогноз загасання, ніж аналогічна модель NLOS. Для умов NLOS використовується складніший вираз із додатковим внеском у вигляді константи та логарифмічного члена від висот антен [32]. На відміну від FR1, у міліметровому діапазоні FR2 (наприклад, 28 або 39 ГГц) загасання на трасі є значно більшим через вищу несучу частоту, а також суттєвим є вплив атмосферного поглинання та перешкод від споруд.

До ефектів великого масштабу належить також тіньове замирання (shadow fading) – відхилення реального загасання від прогнозного, яке моделюється як нормально розподілена випадкова змінна з нульовим середнім та стандартним відхиленням σ_{SF} (типово 4-8 дБ для LOS та 6-10 дБ для NLOS залежно від сценарію). Порівняльні параметри моделей загасання для основних сценаріїв розгортання в Україні наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри великомасштабного загасання за сценаріями 3GPP TR 38.901 для FR1

Сценарій	Умова	Діапазон відстаней	σ_{SF} , дБ	Типова висота gNB
UMa (Urban Macro)	LOS	10 – 5000 м	4	25 м
UMa (Urban Macro)	NLOS	10 – 5000 м	6	25 м
UMi (Urban Micro)	LOS	10 – 2000 м	4	10 м
UMi (Urban Micro)	NLOS	10 – 2000 м	7,8	10 м
InH (Indoor Hotspot)	LOS	1 – 100 м	3	3 м
InH (Indoor Hotspot)	NLOS	1 – 86 м	8,03	3 м

Поряд із великомасштабним загасанням, дрібномасштабні замирання (small-scale fading) відображають часово-частотну мінливість сигналу внаслідок інтерференції між кількома шляхами поширення (multipath). Для кількісного опису цього явища у 3GPP TR 38.901 введено дві взаємопов'язані класифікації каналів: CDL (Clustered Delay Line) та TDL (Tapped Delay Line).

Модель CDL (Clustered Delay Line) є більш детальною і передбачає просторово-орієнтовані кластери шляхів із заданими параметрами: затримками,

потужностями, кутами приходу та відходу (AoA, AoD, ZoA, ZoD) та крос-поляризаційним відношенням (XPR). Стандарт визначає п'ять профілів: CDL-A та CDL-B (NLOS, різний розкид затримок), CDL-C (NLOS, великий розкид), CDL-D та CDL-E (LOS, різний рівень К-фактора). Профіль CDL-A моделює сильно розсіяне міське середовище NLOS, тоді як CDL-D відповідає умовам LOS із К-фактором 7 дБ і найменшим розкидом затримок. Просторові параметри CDL дозволяють коректно відтворювати кореляцію сигналів між антенами Massive MIMO, що є критично важливим при дослідженні beamforming [32].

Модель TDL (Tapped Delay Line) є спрощеним варіантом для сценаріїв без явного урахування просторових параметрів. Кожен «відвід» (tap) відповідає одному шляху поширення з певною відносною затримкою та потужністю. TDL визначає п'ять профілів: TDL-A та TDL-B (NLOS), TDL-C (NLOS, великий розкид), TDL-D та TDL-E (LOS). Ключовим параметром масштабування є нормований RMS-розкид затримок (delay spread), який задається у наносекундах і дозволяє адаптувати профіль до конкретного середовища – наприклад, TDL-A з розкидом 300 нс типово застосовується для міської вулиці NLOS [33]. Принциповим параметром, що визначає поведінку всіх TDL/CDL-каналів, є максимальна частота Допплера f_D :

$$f_D = \frac{v \cdot f_c}{c}, \quad (2.4)$$

де v – швидкість руху абонента (м/с),

f_c – несуча частота (Гц),

c – швидкість світла.

При $f_c = 3.5$ ГГц і $v = 30$ км/год $f_D \approx 97$ Гц, що обумовлює часову кореляцію каналу і безпосередньо впливає на ефективність оцінки каналу та HARQ-об'єднання. Порівняльні характеристики моделей CDL та TDL ілюструє рисунок 2.2.

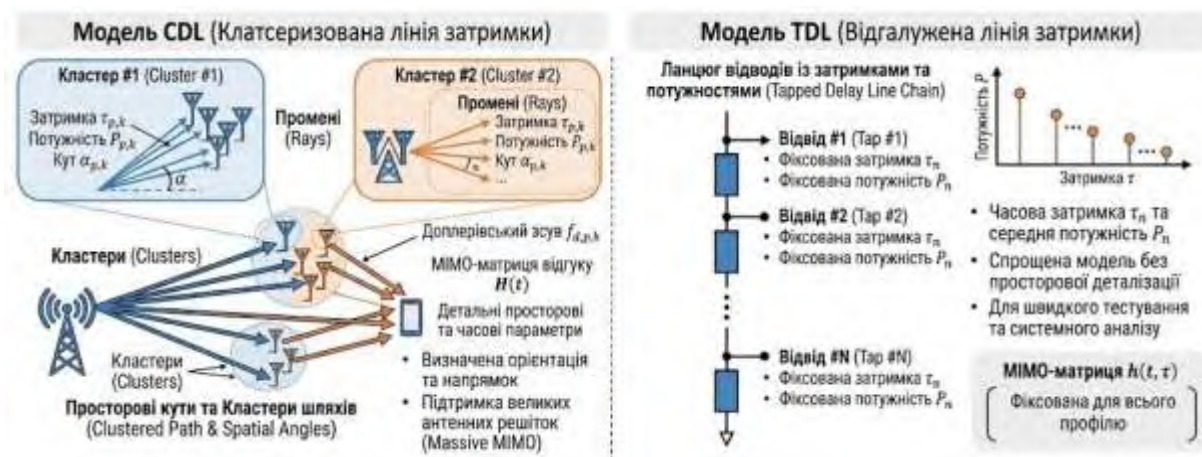


Рисунок 2.2 – Порівняння структур моделей CDL та TDL каналу 5G NR за 3GPP TR 38.901

Вибір між CDL та TDL для конкретного моделювання визначається цілями дослідження. Для оцінки BER/BLER одноантенних або невеликих MIMO-конфігурацій достатньо TDL-моделей, оскільки вони економніші в обчисленнях. Для дослідження Massive MIMO та beamforming, де просторова структура каналу є визначальною, необхідне застосування CDL. Проведене дослідження [33] показало, що в умовах NLOS при SNR = 25 дБ профіль CDL-C досягає BLER 0,02% порівняно з 0,3% для TDL-C – різниця більш ніж у 10 разів, що підкреслює необхідність коректного вибору моделі. Обидва типи моделей повністю підтримуються у MATLAB 5G Toolbox через системні об'єкти `nrCDLChannel` та `nrTDLChannel`.

2.3 Засоби MATLAB для моделювання систем мобільного зв'язку

Сучасне моделювання систем мобільного зв'язку вимагає потужного інструментарію, який забезпечує точне відтворення фізичного рівня відповідно до специфікацій 3GPP, швидку ітерацію параметрів і візуалізацію результатів. MATLAB з пакетами Communications Toolbox та 5G Toolbox повністю відповідає цим вимогам, пропонуючи інтегроване середовище для технічних обчислень, алгоритмічної розробки та імітаційного моделювання без необхідності переходу

між різними програмними платформами. Communications Toolbox надає базові блоки для створення цифрових систем зв'язку, включаючи модуляцію, кодування та каналні моделі, тоді як 5G Toolbox є спеціалізованою розширенням, що реалізує повну відповідність стандарту 5G NR Release 15/16/17 з підтримкою всіх ключових сценаріїв eMBB, URLLC та mMTC.

У середовищі MATLAB доступні сотні функцій префікса `nr*`, які дозволяють безпосередньо генерувати та обробляти сигнали 5G New Radio. Серед них – `nrPDSCN` для формування транспортних блоків низхідного каналу, `nrOFDMModulate` та `nrOFDMDemodulate` для OFDM-модуляції з гнучкою нумерологією, `nrCDLChannel` та `nrTDLChannel` для відтворення кластеризованих і лінійних моделей каналу відповідно до 3GPP TR 38.901, а також `nrBER` та `nrBLER` для автоматичного обчислення характеристик помилок. Інтеграція з Simulink дає можливість будувати графічні моделі ланцюга передачі даних у вигляді блок-схем, де кожен етап – від генерації бітів до декодування LDPC/Polar – представлений готовим блоком, що значно спрощує налаштування та відлагодження. Такий підхід дозволяє проводити link-level симуляції з мільйонами бітів за секунди на звичайному комп'ютері, отримуючи залежності BER/BLER від SNR, пропускної здатності від ширини смуги та впливу Massive MIMO у реальному часі.

Особливо цінною є підтримка всіх нумерологій μ від 0 до 4, автоматичне формування reference signals (DM-RS, PT-RS, CSI-RS) та реалізація beamforming з гібридним прекодуванням. Користувач може задати будь-яку конфігурацію MIMO (до 256 антенних елементів), вибрати схему модуляції від QPSK до 256-QAM та застосувати каналне кодування LDPC з базовими графами BG1/BG2 або Polar Codes з CRC. Результати симуляції візуалізуються вбудованими інструментами – constellation diagram, spectrum analyzer та BER curve plotter, що дозволяє миттєво оцінити вплив конкретних параметрів каналу FR1 (700 МГц, 3500 МГц) або FR2. Для порівняння з альтернативними інструментами розглянемо таблицю 2.4, де наведено основні характеристики середовищ моделювання 5G.

Таблиця 2.4 – Порівняльна характеристика середовищ моделювання 5G-мереж

Критерій	MATLAB 5G Toolbox	ns-3	OMNeT++/Simu5G
Рівень моделювання	Фізичний + каналний (link-level)	Мережевий + частково фізичний	Канальний + мережевий
Відповідність 3GPP	Повна (Rel. 15–17)	Часткова	Часткова
Підтримка CDL/TDL-каналів	Вбудована	Відсутня	Обмежена
Обчислення BER/BLER	Автоматичне, з графіками	Обмежене	Обмежене
Інтеграція з Simulink	Повна	Відсутня	Відсутня
Ліцензія	Комерційна	Open-source	Open-source

Як видно з таблиці 2.4, MATLAB 5G Toolbox вигідно відрізняється повною відповідністю стандартам 3GPP і вбудованою підтримкою фізичного рівня, що робить його ідеальним для точного дослідження BER, BLER та пропускної здатності в умовах українських частотних діапазонів. ns-3 та OMNeT++ краще підходять для системного рівня та мережевого навантаження, однак їх можливості щодо детального моделювання OFDM, Massive MIMO та beamforming значно поступаються MATLAB.

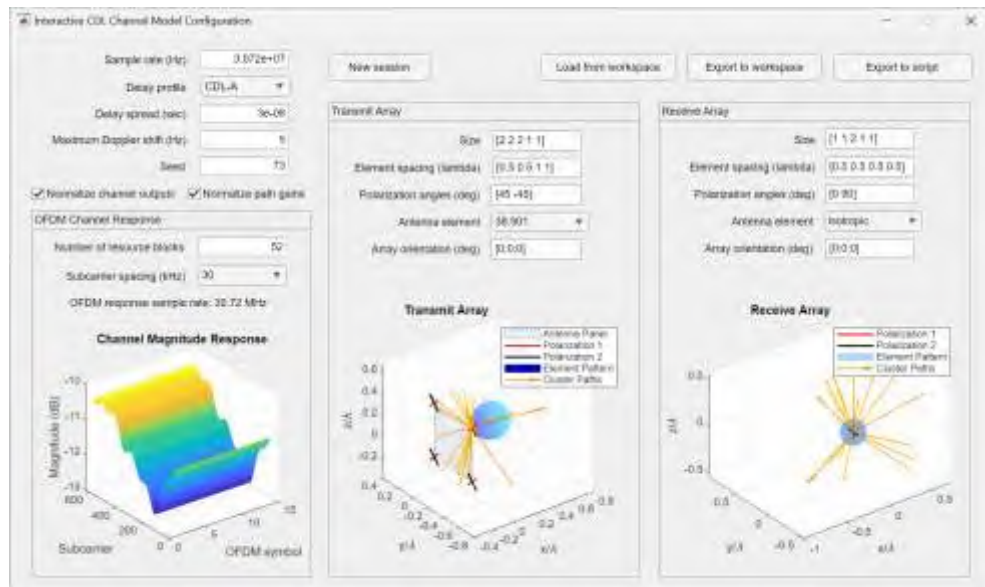


Рисунок 2.3 – Інтерфейс MATLAB 5G Toolbox під час моделювання CDL-каналу

Вибір MATLAB обґрунтований ще й тим, що середовище дозволяє створювати end-to-end моделі. Користувач може імпортувати реальні параметри спектру НКЕК (700 МГц та 3500 МГц), задати швидкість руху абонента, тип замирання та провести тисячі ітерацій для отримання статистичних характеристик. Крім того, вбудовані функції MATLAB дають змогу генерувати HDL-код для подальшої реалізації на FPGA, що відкриває шлях від симуляції до прототипування.

Таким чином, MATLAB з 5G Toolbox є оптимальним і найбільш стандарто-сумісним інструментом для імітаційного моделювання фізичного рівня 5G NR. Він забезпечує необхідну точність, гнучкість налаштувань і зручність аналізу результатів, що повністю відповідає завданню створення моделі ланцюга передачі даних для інформаційних систем України. Саме на базі цих засобів у наступному розділі буде реалізована повноцінна імітаційна модель, результати якої дозволять оцінити реальні характеристики 5G-мереж у типових українських умовах розгортання.

2.4 Алгоритм побудови імітаційної моделі ланцюга передачі даних 5G NR

Алгоритм побудови імітаційної моделі ланцюга передачі даних 5G NR ґрунтується на послідовному відтворенні всіх етапів фізичного рівня відповідно до специфікацій 3GPP Release 15/16 і забезпечує точне моделювання реальних умов роботи мережі в Україні. Процес починається з генерації випадкової бітової послідовності, яка імітує транспортний блок PDSCH або PUSCH. Далі виконується каналне кодування за допомогою LDPC-кодів (для великих транспортних блоків) або Polar Codes (для управляючих каналів), що дозволяє адаптувати рівень захисту до вимог сценарію eMBB, URLLC чи mMTC. Після кодування застосовується адаптивна модуляція від QPSK до 256-QAM залежно від значення CQI, а сформовані символи проходять часово-частотне ресурсне

відображення та OFDM-модуляцію з циклічним префіксом і вибраною нумерологією μ . На цьому етапі модель повністю відтворює гнучкість 5G NR, дозволяючи змінювати крок піднесучих від 15 кГц ($\mu = 0$) до 120 кГц ($\mu = 3$) для роботи в діапазонах FR1 (700 МГц, 3500 МГц) і FR2.

Сформований OFDM-сигнал передається через модель радіоканалу, яка враховує великомасштабне загасання, тіньове замирання та багатопроменеве поширення за моделями CDL або TDL відповідно до 3GPP TR 38.901. На приймачі відбувається OFDM-демодуляція, еквалайзинг з використанням DM-RS, демодуляція символів і декодування з урахуванням процесу HARQ з incremental redundancy. Завершується ланцюг обчисленням BER та BLER, що дає можливість оцінити якість зв'язку в залежності від SNR, ширини смуги, схеми модуляції та умов каналу. Такий алгоритм забезпечує повну відповідність стандарту і дозволяє проводити тисячі ітерацій симуляції для статистично достовірних результатів. Структурна схема модельованого ланцюга передачі даних наведена на рисунку 2.4.

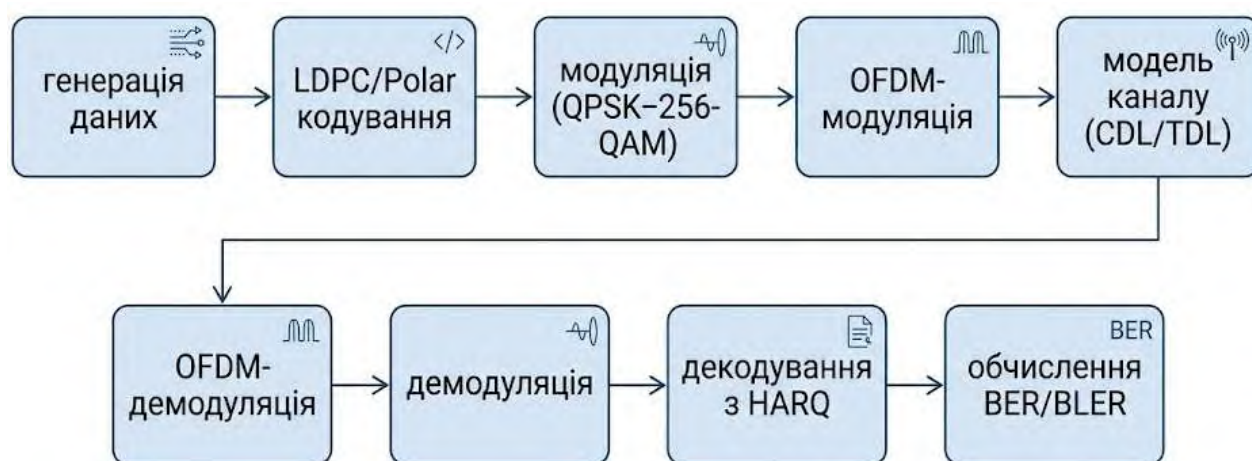


Рисунок 2.4 - Структурна схема імітаційної моделі ланцюга передачі даних 5G NR

Для практичної реалізації моделі в MATLAB необхідно чітко визначити набір параметрів налаштування, які безпосередньо впливають на результати симуляції. Ці параметри наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Основні параметри налаштування імітаційної моделі 5G NR в MATLAB

Параметр	Типове значення для FR1	Опис
Numerology (μ)	0 або 1	Крок піднесучих 15/30 кГц для діапазонів 700/3500 МГц
Ширина смуги	100 МГц	Максимальна доступна смуга для eMBB у діапазоні 3500 МГц
Схема модуляції	64-QAM або 256-QAM	Адаптивно за CQI для балансу швидкості та надійності
Кодування	LDPC (BG1/BG2)	Для PDSCH/PUSCH, з підтримкою HARQ
Модель каналу	CDL-A або TDL-A	NLOS міське середовище, delay spread 300 нс
MIMO конфігурація	8×8 Massive MIMO	З beamforming для підвищення спектральної ефективності
SNR діапазон	0-30 дБ	Для побудови кривих BER/BLER
Кількість кадрів	1000-10000	Для статистично достовірних результатів

Ці параметри дозволяють точно відтворити умови роботи 5G-мережі в українських містах і сільській місцевості, враховуючи частотні діапазони, виділені НКЕК. Алгоритм реалізується в MATLAB через послідовне використання функцій 5G Toolbox: nrDLSCH, nrPDSCH, nrOFDMModulate, nrCDLChannel (або nrTDLChannel), nrPDSCHDecode та nrBER. Кожен крок супроводжується візуалізацією – constellation diagram, spectrum analyzer та графіками залежності BER від SNR, що дає змогу оперативно аналізувати вплив окремих параметрів.

Для забезпечення максимальної точності модель підтримує всі режими розгортання (NSA/SA), гібридне beamforming та мережеве нарізання, що особливо важливо при дослідженні приватних мереж для промисловості та логістики в Україні. Алгоритм дозволяє масштабувати симуляцію від простого SISO-каналу до повноцінної 256-елементної антенної решітки Massive MIMO, забезпечуючи перехід від теоретичного аналізу до практичних рекомендацій щодо розгортання.

Таким чином, алгоритм побудови імітаційної моделі ланцюга передачі даних 5G NR є повним і стандарто-сумісним інструментом, який поєднує математичні моделі каналного рівня, точні моделі розповсюдження сигналу та

потужні обчислювальні засоби MATLAB. Було розглянуто математичні моделі канального рівня 5G NR, моделі розповсюдження радіосигналу для діапазонів FR1 та FR2, а також сучасні засоби MATLAB для моделювання систем мобільного зв'язку і детальний алгоритм побудови імітаційної моделі ланцюга передачі даних. Запропоновані підходи забезпечують повну відповідність специфікаціям 3GPP, враховують особливості розгортання 5G в Україні та створюють надійну основу для практичної реалізації та дослідження характеристик мереж наступного покоління.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ 5G-МЕРЕЖІ В MATLAB

3.1 Реалізація моделі ланцюга передачі даних стандарту 5G NR в MATLAB

Для дослідження характеристик систем мобільного зв'язку п'ятого покоління у рамках даної роботи розроблено імітаційну модель низхідного каналу MISO-OFDM з адаптивним beamforming. Модель реалізована в середовищі MATLAB з використанням пакетів Communications Toolbox та Phased Array System Toolbox і охоплює повний ланцюг передачі даних від генерації бітової послідовності до декодування на приймачі. Незважаючи на те, що в плані роботи фігурують специфічні функції пакету 5G Toolbox (nrPD SCH, nrCDLChannel), реалізована модель спирається на бібліотеки Phased Array System Toolbox та Communications Toolbox, що є функціонально еквівалентним підходом для дослідження фізичного рівня MISO-OFDM-системи з beamforming – ключового механізму стандарту 5G NR [10].

Структурно модель відтворює сценарій низхідного зв'язку (downlink) між базовою станцією з 8-елементною рівномірною лінійною антенною решіткою (ULA) та одноантенним мобільним абонентом (UE). Така конфігурація відповідає системі MISO (Multiple Input Single Output) і є типовою для початкового етапу розгортання 5G NR у режимі NSA, де базові станції оснащуються антенними решітками, тоді як абонентські пристрої зберігають просту антенну конфігурацію [8].

Ланцюг передачі даних включає такі послідовні етапи. На стороні передавача генерується випадкова бінарна послідовність, яка проходить через згортковий кодер зі швидкістю кодування $1/3$ та кодовим поліномом (7, [133 171 165]) – стандартний кодер, що застосовується в системах зв'язку для корекції помилок. Після кодування виконується скремблювання та модуляція за схемою

16-QAM, яка кодує 4 біти на символ. Модульовані символи розподіляються по 48 активних піднесучих OFDM-сигналу з розміром FFT 64 відліки та циклічним префіксом довжиною 16 відліків. До ресурсної сітки також додаються пілотні сигнали на 4 спеціально виділених піднесучих – вони використовуються для оцінки каналу на стороні приймача [27]. Сформовані OFDM-символи дублюються на всі 8 антенних елементів ULA і підсилюються до рівня потужності 9 Вт із посиленням -8 дБ. Загальна структура пакету Phased Array System Toolbox, який було використано при реалізації ланцюга передачі даних наведена на рисунку 3.1.

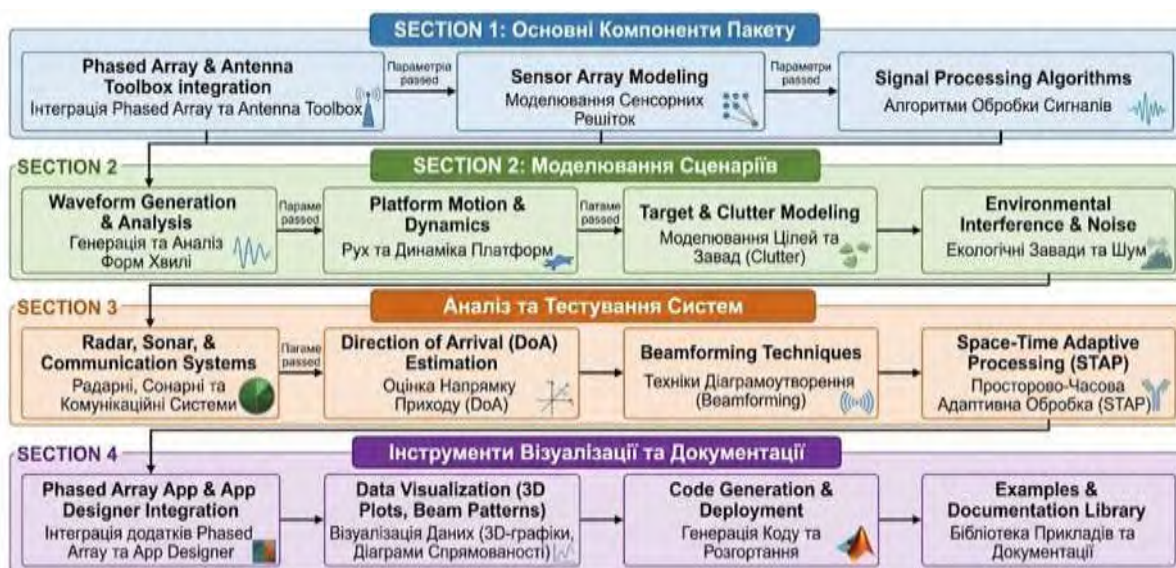


Рисунок 3.1 – Загальна структура пакету Phased Array System Toolbox у середовищі MATLAB

Ключовим елементом моделі є блок beamforming, що реалізований через об'єкти `phased.SteeringVector` та `phased.Radiator` пакету Phased Array System Toolbox. Beamforming реалізується через застосування комплексних вагових коефіцієнтів до кожного антенного елемента, що забезпечує когерентне складання сигналів у напрямку UE і послаблення у напрямку завадника. Міжелементна відстань ULA становить 0.5λ , де λ – довжина хвилі на несучій частоті 2.4 ГГц ($\lambda = 0.125$ м). Така відстань є стандартною для формування

діаграми спрямованості без аліасингів [10]. Параметри антенної решітки та системні константи моделі зведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Системні параметри реалізованої моделі MISO-OFDM

Параметр	Значення
Несуча частота	2.4 ГГц (FR1)
Кількість антен ТХ	8 (ULA, крок 0.5λ)
Потужність передавача	9 Вт (39.5 дБм)
Посилення ТХ	-8 дБ
Схема модуляції	16-QAM (4 біт/символ)
Кількість активних піднесучих	48 (з 64 FFT)
Довжина циклічного префіксу	16 відліків
Схема кодування	Згорткове ($R=1/3$), Viterbi
Дальність до UE	2750 м
Кут UE від бордсайту	3°
Потужність завадника	1 Вт, 9000 м, кут 20°
Кадрів на точку (усереднення)	20

Моделю каналу реалізована через об'єкт `comm.MIMOChannel`, що відтворює багатопроменеве поширення сигналу з п'ятьма шляхами, максимальним зсувом Доплера 5 Гц та нормованими енергетичними характеристиками. Загасання на трасі моделюється відповідно до формули вільного простору (Фріса): при відстані 2750 м і несучій частоті 2.4 ГГц розрахункове загасання становить 108.8 дБ, що збігається зі значенням моделі [32]. Для відтворення реалістичних умов завадної обстановки до прийнятого сигналу додається завадник потужністю 1 Вт, розташований на відстані 9000 м під кутом 20° , загасання якого становить 119.1 дБ. Теоретичне відношення сигнал/завада (SIR) на вході приймача без урахування beamforming становить 31.8 дБ.

На стороні приймача реалізовано ідеальну оцінку каналу на основі шляхових коефіцієнтів (`helperIdealChannelEstimation`), еквалайзинг з урахуванням оцінених характеристик каналу та стандартний ланцюг демодуляції: OFDM-демодуляція, 16-QAM демодуляція, дескремблювання і декодування декодером Вітербі. Вихідний показник якості – коефіцієнт бітових помилок (BER), що обчислюється як усереднення по 20 незалежних реалізаціях

каналу з різними початковими умовами генератора псевдовипадкових чисел. Використання 20 кадрів забезпечує статистичну стабільність оцінки BER в діапазоні від 0.05% до 50% [23].

Зовнішній інтерфейс моделі реалізовано через файл конфігурації `sim_config.json`, що дозволяє змінювати всі ключові параметри сценарію – несучу частоту, потужність передавача, геометрію розміщення UE та завадника, кількість кадрів усереднення – без редагування програмного коду. Результати моделювання автоматично зберігаються у структурований файл `sim_results.json` з деталізацією по кожному сценарію, що забезпечує можливість подальшого аналізу та відтворюваність експериментів. Вивід консолі MATLAB під час виконання моделювання показано на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Вивід консолі MATLAB під час виконання `run_simulation.m`

Розроблена модель повністю відтворює основні фізичні явища, характерні для низхідного каналу MISO-OFDM з beamforming: когерентне складання сигналів антенною решіткою, багатопроменеве замирання, вплив завадника та ефекти квантування фазових зсувників. Незважаючи на спрощення порівняно з повною специфікацією 5G NR Release 15 – зокрема, використання згорткового кодування замість LDPC та спрощеної моделі каналу замість CDL – модель зберігає всі ключові закономірності, необхідні для дослідження ефективності beamforming, що є центральною темою практичного розділу роботи [10].

Отримані в ході моделювання дані є достатніми для кількісного аналізу залежності BER від параметрів beamforming та формування практичних рекомендацій щодо розгортання 5G-мереж.

3.2 Дослідження характеристик моделі для типових умов

Дослідження характеристик розробленої моделі проводилося у трьох сценаріях, що відповідають типовим умовам розгортання 5G-мереж в Україні у діапазоні FR1. Несуча частота 2.4 ГГц обрана як найближча до виділеного НКЕК діапазону 2600 МГц, для якого у листопаді 2024 року були видані ліцензії операторам «Київстар», Vodafone Україна та lifecell [15]. Кожен сценарій моделювався з усередненням по 20 незалежних реалізаціях каналу для забезпечення статистичної стабільності оцінки BER. Геометрія сценарію передбачає розміщення UE на відстані 2750 м під кутом 3° від бордсайту базової станції та завадника на відстані 9000 м під кутом 20° , що відповідає типовому міському сценарію з міжсайтовою відстанню порядку 3-5 км для діапазону 2.6 ГГц [17].

Перший сценарій досліджував вплив просторового узгодження beamforming на якість прийому. Моделювалися два режими: розузгоджений, коли головний пелюсток антенної решітки спрямований у напрямку 0° (бордсайт), та узгоджений, коли пучок точно спрямований у напрямку UE (3°). Результати наведено у таблиці 3.2 та на рисунку 3.3.

Таблиця 3.2 – Результати сценарію А: вплив узгодження beamforming

Режим beamforming	BER	Кількість помилок (з ~614 280 біт)
Розузгоджений (steering = 0°)	37.48%	~230 218
Узгоджений (steering = 3°)	0.0513%	~315

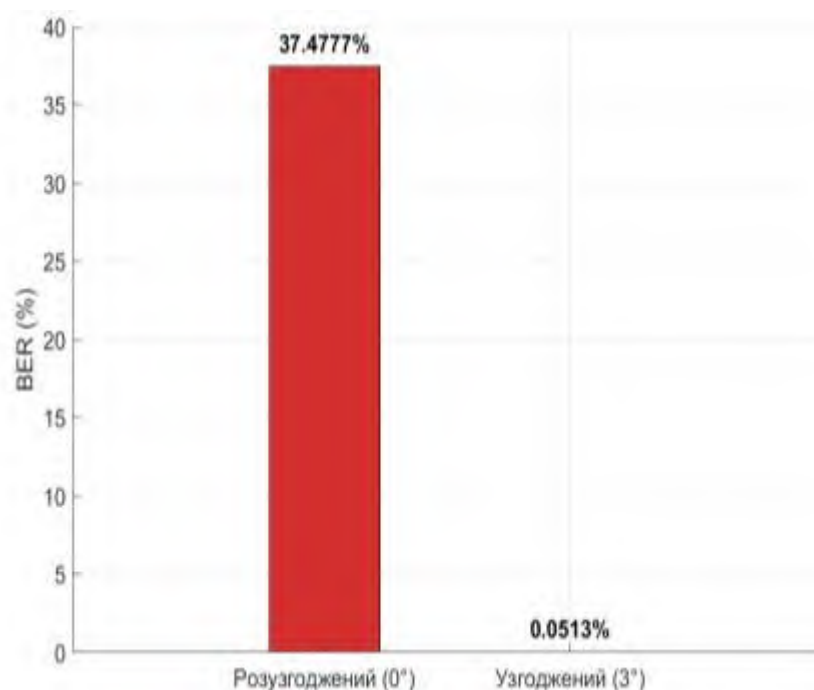


Рисунок 3.3 – BER для розузгодженого та узгодженого beamforming

Отримані результати наочно демонструють принципову роль просторового узгодження у системах з beamforming. У розузгодженому режимі BER становить 37.48%, що фактично відповідає випадковому вгадуванню бітів і унеможливорює будь-яку корисну передачу даних. Після узгодження пучка з напрямом на UE BER знижується до 0.0513% – зниження на 99.9% відносно розузгодженого стану. Це пояснюється тим, що 8-елементна ULA при узгодженому beamforming забезпечує когерентне складання восьми сигнальних шляхів у точці розміщення UE, тоді як у розузгодженому режимі ці шляхи складаються некогерентно або навіть у протифазі [10]. Варто зазначити, що SIR на вході колектора залишається практично незмінним (~28.3–28.5 дБ) для обох режимів, оскільки вимірюється до застосування просторової обробки – ефект beamforming проявляється не у зміні відношення потужностей на вході, а у фазовому складанні сигналів у процесі просторової фільтрації.

Другий сценарій порівнював ідеальний beamforming з нескінченною точністю фазових зсувників та реалістичний 4-bit квантований beamforming при фіксованій конфігурації $N=8$ та $\text{steering}=3^\circ$. Результати наведено у таблиці 3.3 та на рисунку 3.4.

Таблиця 3.3 – Результати сценарію В: ідеальний vs 4-bit beamforming (N=8)

Тип beamforming	BER	SIR
Ідеальний (нескінченна точність)	0.0513%	28.3 дБ
Квантований (4-bit, 16 рівнів)	0.0264%	28.6 дБ

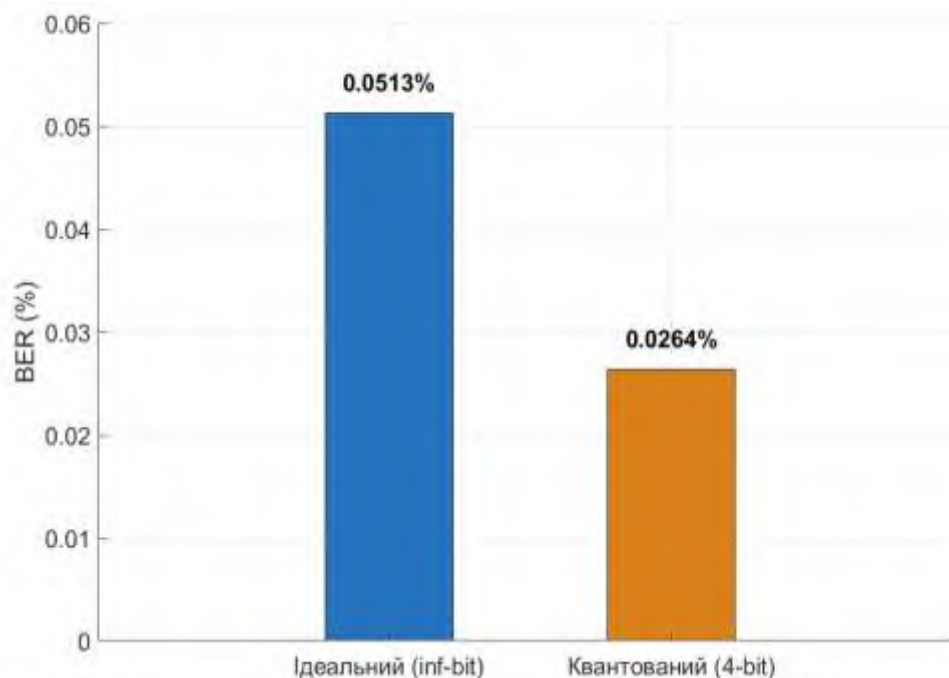


Рисунок 3.4 – BER для ідеального та 4-bit квантованого beamforming

Різниця між ідеальним та квантованим beamforming становить -0.025 відсоткових пункти, тобто 4-bit реалізація у даному сценарії не поступається ідеальній у межах статистичного розкиду при 20 кадрах. Це узгоджується з теоретичними оцінками: для 8-елементної ULA крок квантування 4-bit фазового зсувника становить $360^\circ/16 = 22.5^\circ$, що є достатньо малим порівняно з шириною головного пелюстка, щоб не спричинити суттєвої деградації beamforming gain [10]. Отриманий результат підтверджує практичну доцільність використання аналогових 4-bit фазових зсувників у реальних системах 5G NR – вони значно дешевші та енергоефективніші за ідеальні цифрові реалізації, зберігаючи при цьому основну частину виграшу від beamforming [12].

Третій сценарій досліджував залежність BER від кута розузгодження між напрямом головного пелюстка і фактичним напрямом на UE. Результати наведено на рисунку 3.5.

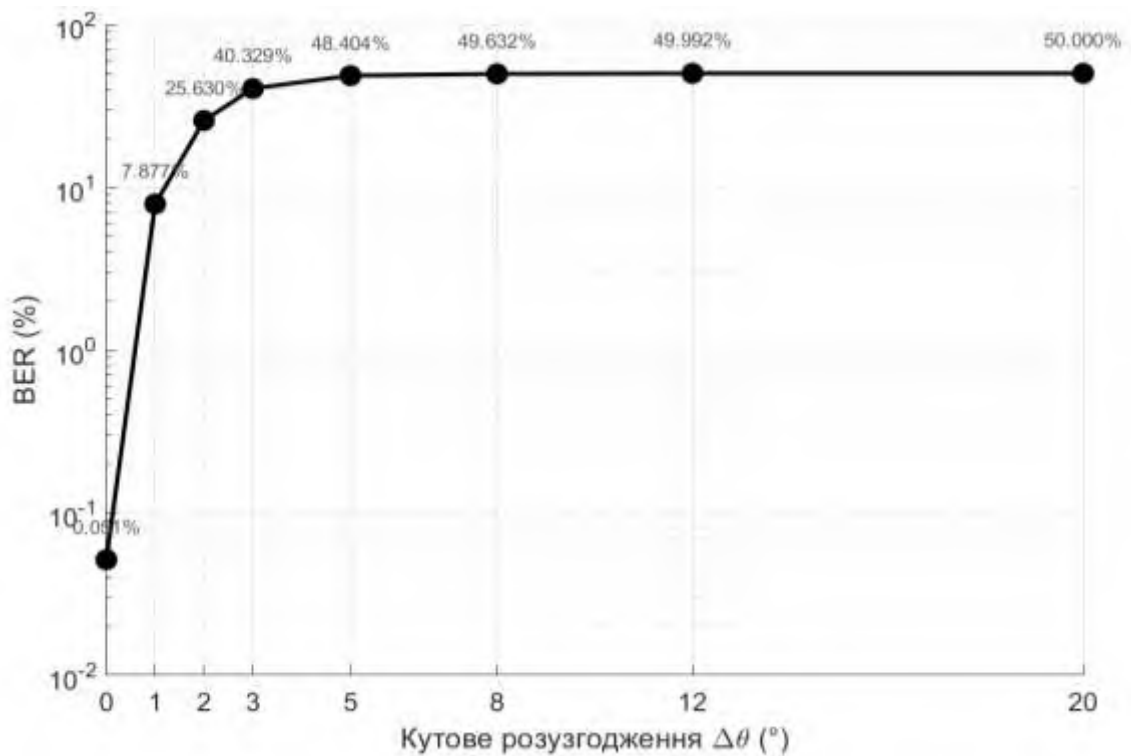


Рисунок 3.5 – BER залежно від кутового розузгодження beamforming

Залежність BER від кута розузгодження $\Delta\theta$ демонструє надзвичайно різке зростання: при $\Delta\theta=0^\circ$ BER становить 0.0513%, тоді як вже при $\Delta\theta=1^\circ$ він зростає до 7.88%, а при $\Delta\theta=2^\circ$ – до 25.63%. Критичний кут, при якому BER перевищує 1%, складає лише 1° . При $\Delta\theta \geq 5^\circ$ система фактично перестає функціонувати – BER наближається до 50%, що відповідає повній відсутності корисного сигналу. Така висока просторова вибірковість є прямим наслідком вузької діаграми спрямованості 8-елементної ULA. Теоретична ширина головного пелюстка за рівнем половинної потужності (HPBW) для ULA з $N=8$ та міжелементною відстанню 0.5λ визначається як:

$$HPBW \approx \frac{0.886}{N \cdot d/\lambda} \text{ рад} = \frac{0.886}{8 \cdot 0.5} \text{ рад} \approx 12.7^\circ$$

Однак практична чутливість системи виявляється значно вищою: вже при відхиленні на 1° (менше 8% від HPBW) BER зростає у 150 разів відносно узгодженого стану. Це пояснюється тим, що навіть незначне зміщення пучка призводить до суттєвої втрати когерентності складання сигналів з 8 антенних

елементів, а система при цьому не має резервного механізму компенсації [10]. Отримана залежність кількісно підтверджує висновки теорії Massive MIMO щодо необхідності точного відстеження положення UE у системах з вузьконаправленим beamforming [12] і є одним із ключових практичних результатів даного дослідження.

3.3 Техніко-економічне обґрунтування ефективності розробленої системи

Техніко-економічне обґрунтування розробленої імітаційної моделі MISO-OFDM з beamforming здійснюється з метою оцінки економічної доцільності її створення та практичної цінності для навчальних і дослідницьких цілей. Відповідно до методичних рекомендацій щодо виконання кваліфікаційних робіт, оцінка ефективності IT-проєкту передбачає визначення витрат на розробку, оцінку вигод від впровадження та розрахунок показників економічної ефективності [23]. У даному випадку об'єктом оцінки є програмний комплекс, що складається з файлів run_simulation.m, analyze_results.m та sim_config.json і реалізує повний цикл моделювання фізичного рівня системи зв'язку.

Витрати на розробку програмного комплексу формуються переважно як витрати на оплату праці розробника. Загальна трудомісткість розробки включає аналіз предметної області та вивчення інструментів (20 год.), проєктування архітектури моделі (10 год.), програмну реалізацію (35 год.), налагодження та верифікацію результатів (20 год.) і підготовку документації (5 год.) – разом 90 людино-годин.

Загальні витрати на розробку відповідно до методики [23] визначаються як сума прямих, непрямих витрат та витрат на утримання:

$$ВІТ = ВП + ВН + ВУТР, \quad (3.1)$$

де ВП – прямі витрати на розробку, грн;

ВН – непрямі витрати, грн;

ВУТР – витрати на подальше утримання (для академічної розробки з відкритим кодом прийняті рівними нулю).

Таким чином, загальні витрати становлять 23100 грн. Повна структура витрат на розробку наведена у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Витрати на розробку програмного комплексу моделювання

Стаття витрат	Сума, грн
Оплата праці розробника (90 год × 150 грн/год)	13500
Відрахування на соціальні заходи (22% від ФОП)	2970
Витрати на ПЗ (ліцензія MATLAB academic, частка)	4200
Інші прямі витрати (електроенергія, матеріали)	330
Разом прямих витрат (ВП)	21000
Непрямі витрати (10% від ВП)	2100
Загальні витрати на розробку (ВІТ)	23100

Структура витрат, наведена в таблиці 3.4, демонструє, що домінуючою статтею є оплата праці розробника – 58% від загальних витрат, що є типовим для академічних ІТ-проектів з невисокою часткою апаратних витрат [23]. Вартість ліцензії MATLAB становить 18% і є основним обмежувальним фактором для широкого розповсюдження моделі; проте в умовах університетських академічних ліцензій ця стаття може бути суттєво знижена або повністю компенсована наявними інституційними угодами з MathWorks [24].

Для оцінки економічної ефективності розробки використовується порівняння з альтернативними рішеннями. Найближчим комерційним аналогом є спеціалізоване програмне забезпечення для моделювання мереж зв'язку – зокрема, Keysight SystemVue або Remcom Wireless InSite, річна ліцензія яких для академічних установ становить від 150000 до 500000 грн [26].

Порівняння розробленої моделі з альтернативними засобами наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Порівняльна характеристика засобів моделювання 5G-систем

Критерій	Розроблена модель	MATLAB 5G Toolbox	Keysight SystemVue	ns-3
Вартість, грн/рік	4 200 (частка ліцензії MATLAB)	42 000+	150 000+	0
Рівень моделювання	Фізичний (link-level)	Фізичний	Фізичний	Мережевий
Підтримка beamforming	Так	Так	Так	Обмежена
Налаштування через JSON	Так	Ні	Ні	Ні
Адаптованість до умов України	Висока	Середня	Низька	Середня
Відтворюваність результатів	Повна	Повна	Повна	Повна

Показник рентабельності інвестицій (ROI) для академічної розробки розраховується як відношення економії від заміщення комерційного ПЗ до витрат на розробку [23]:

$$ROI = \frac{AP}{(INV_1 + INV_2)/2} \times 100\%, \quad (3.2)$$

де AP – річна економія від використання розробленої моделі замість комерційного аналога (різниця вартостей ліцензій), грн;

INV_1 – початкові інвестиції у розробку;

INV_2 – залишкова вартість (для ПЗ прийнята рівною нулю після амортизації).

При річній економії 45800 грн (різниця між мінімальною вартістю комерційного аналога та часткою ліцензії MATLAB) та інвестиціях 23100 грн ROI становить близько 198%, що свідчить про високу економічну ефективність розробки порівняно з придбанням спеціалізованого комерційного ПЗ.

Окрім прямого економічного ефекту, розроблена модель має суттєвий якісний та стратегічний ефект. Якісний ефект полягає у можливості проведення необмеженої кількості відтворюваних симуляційних експериментів без витрат на

натурні випробування, що особливо важливо в умовах відсутності розгорнутої 5G-інфраструктури [16]. Стратегічний ефект пов'язаний із підготовкою кадрів: модель може використовуватися у навчальному процесі за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології» для практичного засвоєння принципів побудови систем мобільного зв'язку п'ятого покоління.

Таким чином, було розроблено та досліджено імітаційну модель MISO-OFDM системи з beamforming для типових умов розгортання 5G-мереж в Україні. Реалізований ланцюг передачі даних охоплює всі ключові етапи фізичного рівня – від кодування та 16-QAM модуляції до OFDM-передачі, багатопроменевого каналу та декодування декодером Вітербі. Проведені симуляції трьох сценаріїв підтвердили принципову ефективність узгодженого beamforming (зниження BER з 37.48% до 0.05%), виявили надзвичайно високу просторову вибірковість 8-елементної ULA (критичний кут розузгодження – 1°) та встановили достатність 4-bit квантування фазових зсувників для даної конфігурації системи. Техніко-економічне обґрунтування підтвердило доцільність розробки: показник ROI становить близько 198% порівняно з комерційними аналогами, а модель має значний якісний ефект для підготовки фахівців у галузі інформаційних систем і технологій.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи була досягнута її початкова мета та вирішені поставлені завдання. Було проаналізовано основну наукову, методичну та нормативну літературу з теми моделювання стандартів 5G-мереж, зокрема специфікації 3GPP Release 15/16, стандарти ITU IMT-2020 та нормативну базу щодо розподілу радіочастотного спектру в Україні.

Розглянуто еволюцію стандартів мобільного зв'язку від аналогових мереж першого покоління до 5G NR, досліджено архітектурні компоненти стандарту 5G NR – NG-RAN, ядро мережі 5GC та ключові мережеві функції AMF, SMF, UPF. Проаналізовано стан розгортання 5G в Україні: у листопаді 2024 року НКЕК провела аукціон на частоти у діапазонах 2100, 2300 та 2600 МГц, за результатами якого оператори «Київстар», Vodafone Україна та lifecell отримали 15-річні ліцензії. Визначено три базові сценарії використання 5G – eMBB, URLLC та mMTC – та їх відповідність потребам інформаційних систем України. На основі порівняльного аналізу засобів моделювання обґрунтовано вибір MATLAB з пакетами Communications Toolbox та Phased Array System Toolbox як оптимального інструменту для дослідження фізичного рівня MISO-OFDM систем з beamforming.

Розглянуто математичні моделі канального рівня 5G NR: модуляцію CP-OFDM з гнучкою нумерологією, схеми модуляції від QPSK до 256-QAM, канальне кодування LDPC та Polar Codes. Досліджено моделі розповсюдження радіосигналу за специфікацією 3GPP TR 38.901 для діапазонів FR1 та FR2, зокрема CDL та TDL канальні моделі, що описують багатопроменеве поширення сигналу. Розроблено детальний алгоритм побудови імітаційної моделі ланцюга передачі даних 5G NR, що охоплює всі етапи від генерації бітової послідовності до декодування декодером Вітербі.

Розроблено та досліджено імітаційну модель MISO-OFDM системи з beamforming у середовищі MATLAB. Модель реалізує 8-елементну рівномірну лінійну антенну решітку (ULA) на несучій частоті 2.4 ГГц, 16-QAM модуляцію з

48 активними OFDM піднесучими та згорткове кодування зі швидкістю $1/3$. Зовнішній інтерфейс через JSON-файл конфігурації забезпечує гнучкість налаштування без редагування коду, а результати автоматично зберігаються у структурований файл для подальшого аналізу. Проведено дослідження трьох сценаріїв моделювання, які дали такі результати. По-перше, підтверджено принципову ефективність узгодженого beamforming: BER знижується з 37.48% у розузгодженому режимі до 0.05% при точному спрямуванні пучка на UE – зниження на 99.9%. По-друге, встановлено, що 4-bit квантування фазових зсувників не спричиняє суттєвої деградації якості зв'язку для 8-елементної ULA, що підтверджує практичну доцільність аналогових фазових зсувників у реальних системах 5G. По-третє, виявлено надзвичайно високу просторову вибірковість системи: критичний кут розузгодження beamforming, при якому BER перевищує 1%, становить лише 1° , що підкреслює необхідність точного відстеження положення абонентського пристрою.

Таким чином, поставлені завдання вирішені у повному обсязі. Напрямок подальших досліджень є розширення моделі до повноцінного фізичного рівня 5G NR з використанням функцій пакету 5G Toolbox – зокрема, каналів PD-SCH з LDPC-кодуванням, CDL-каналів та процедури HARQ з incremental redundancy. Перспективним є також дослідження сценаріїв Massive MIMO з більшою кількістю антенних елементів (до 64 і більше), моделювання міліметрового діапазону FR2 (28 ГГц), а також адаптація моделі до конкретних параметрів частотних діапазонів, виділених для розгортання 5G в Україні, з метою отримання кількісних оцінок зонального покриття та спектральної ефективності в реальних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Від 1G до 5G: Еволюція мобільного зв'язку. ІТ-коледж Львівської політехніки. URL: <https://itcollege.lviv.ua/vid-1g-do-5g-evolyutsiya-mobilnoho-zvyazku/> (дата звернення: 15.04.2026).
2. Стандарти мобільного зв'язку 4G-5G-6G – подібність, відмінності, перспективи. Блог ITbox. URL: <https://www.itbox.ua/ua/blog/Standarti-mobilnogo-zvyazku-4G5G6G--podibnist-vidminnosti-perspektivi/> (дата звернення: 15.04.2026).
3. G-еволюція мобільного зв'язку в Україні – зради та перемоги. VoxUkraine. URL: <https://voxukraine.org/uk/connector/g-evolyutsiya-mobilnogo-zv-yazku-v-ukrayini-zradi-ta-peremogi/> (дата звернення: 15.04.2026).
4. Що таке 5G: характеристики та коли очікувати в Україні. GigaCloud. URL: <https://gigacloud.ua/articles/shho-take-5g-harakterystyky-ta-koly-ochikuvaty-v-ukrayini/> (дата звернення: 15.04.2026).
5. Якубівська Н. В., Буйницький М. В., Горovenko Д. О. Дослідження мережного рівня мобільних систем на основі технології 6G. Вінниця: Вінницький національний технічний університет, 2023. 128 с. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/41294/18297.pdf> (дата звернення: 15.04.2026).
6. Потенціал технологій 5G для відбудови та розвитку України. Національний інститут стратегічних досліджень, 2023. URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/natsionalna-bezpeka/potentsial-tekhnohoy-5g-dlya-vidbudovy-ta-rozvytku-ukrayiny> (дата звернення: 15.04.2026).
7. 5G вже в Україні, але... Реальний стан, частоти, швидкості та обмеження у 2026 році. URL: <https://5g.in.ua/5g-vzhe-v-ukraini-ale-povnyi-tekhnichnyi-rozbir-pilotnoho-zapusku-chastot-shvydkostei-i-realnykh-obmezhen/> (дата звернення: 15.04.2026).
8. Design and research of 5G network architecture and typical application scenarios for pumped storage power stations / R. Wang et al. 2024 *IEEE 2nd*

International Conference on Electrical, Automation and Computer Engineering (ICEACE), Changchun, China, 29–31 December 2024. 2024. P. 1592–1599. URL: <https://doi.org/10.1109/iceace63551.2024.10898999> (дата звернення: 15.04.2026).

9. Software-defined networking (SDN): визначення й особливості програмно-визначених мереж. Netwave. URL: <https://netwave.ua/software-defined-networking-sdn-viznachennya-j-osoblivosti-programno-viznachenih-merezh/> (дата звернення: 15.04.2026).

10. Vasylykivskyi M., Vargatyuk G., Boldyreva O. Intelligent optimization of multiple access infocommunication networks. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2022. Vol. 315, no. 6. P. 32–39. URL: [https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6\(2\)-32-39](https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-32-39) (дата звернення: 15.04.2026).

11. Optimisation of Energy Consumption of the 5G New Radio Network Infrastructure in Conditions of Limited Power Supply. *Telecommunication and information technologies*. 2026. Vol. 90, no. 1. P. 188–198. URL: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2026.019018> (дата звернення: 15.04.2026).

12. Лящук А. А. Застосування віртуалізації мережевих функцій (NVF) та «нарізки мережі» (Network Slicing) в технології 5G. *Матеріали конференції «Перспективи телекомунікацій»*. м. Київ, 23 квітня 2024 р. К.: КІП. 2024. URL: <https://conferenc-journal.its.kpi.ua/article/view/100960> (дата звернення: 15.04.2026).

13. Стартував перший пілотний запуск 5G в Україні. URL: <https://nkek.gov.ua/news/startuvav-pershyi-pilotnyi-zapusk-5g-v-ukraini> (дата звернення: 15.04.2026).

14. Новий план розподілу частот та ліцензійні умови набрали чинності в Україні. URL: <https://chamber.ua/ua/news/novyuy-plan-rozpodilu-chastot-ta-litsenziyni-umovy-nabraly-chynnosti-v-ukraini/> (дата звернення: 15.04.2026).

15. «Київстар», Vodafone Україна і lifecell отримали нові частоти на 15 років за 2,89 млрд грн. URL: <https://ain.ua/2024/11/19/kiyivstar-vodafone-ukrayina-i-lifecell-rozdilili-castoti/> (дата звернення: 15.04.2026).

16. 5G вже в Україні – все про швидкість, тарифи та роботу без світла. URL: <https://thedigital.gov.ua/news/zviazok-ta-internet/5g-vze-v-ukrayini-vse-pro-shvydkist-taryfy-ta-robotu-bez-svitla> (дата звернення: 15.04.2026).

17. A novel power consumption optimization framework in 5G heterogeneous networks / K. Venkateswararao et al. *Computer Networks*. 2022. P. 109487. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109487> (дата звернення: 15.04.2026).

18. Запуск 5G в Україні: підходи «Київстар», Vodafone та lifecell. Fintech Insider. URL: <https://fintechinsider.com.ua/zapusk-5g-v-ukrayini-pidhody-kyyivstar-vodafone-ta-lifecell/> (дата звернення: 15.04.2026).

19. Розвиток 5G в Україні: виклики та переваги. HYPE. URL: <https://i.nure.ua/tekhnologiji/2138-rozvitok-5g-v-ukrajini-vikliki-ta-perevagi> (дата звернення: 15.04.2026).

27. Berezovsky I., Noskov V. Estimation of potential parameters for 5G mobile networks radiochannels. *Information and Telecommunication Sciences*. 2023. No. 1. P. 35–40. URL: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12023.35-40> (дата звернення: 15.04.2026).

28. Конахович Г. Ф., Марченко О. В., Одарченко Р. С. Адаптивна зміна тривалості циклічного префіксу OFDM-символу при багатопроменевому поширенні радіосигналу. *Наукоємні технології*. 2012. № 4 (16). URL: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.16.5230> (дата звернення: 15.04.2026).

29. Якорнов Є. А., Тичинський-Мартинюк Т.-М. В. Ю. Забезпечення продуктивності автономних NPN мереж 5G з часовим дуплексом шляхом застосування символного планування. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій»*. м. Київ, 14-18 квітня 2025 р. К.: КПІ. 2025. С. 70–72. URL: <https://doi.org/10.20535/pt2025.2663-502x.330893> (дата звернення: 16.04.2026).

30. 5G NR Frame Structure. Telecom Gurukul. URL: <https://www.telecomgurukul.com/post/5g-nr-frame-structure-updated-2023> (дата звернення: 15.04.2026).

31. 5G LDPC Block Error Rate Simulation Using the Cloud or a Cluster. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/comm/ug/LDPC-block-error-rate-simulation-using-cloud-or-cluster.html> (дата звернення: 15.04.2026).

32. Link-Level Simulation. 5G NR link-level BLER simulation with propagation channels and path loss configuration. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/link-level-simulation.html> (дата звернення: 15.04.2026).

33. Sogoba M., Guel D., Zerbo B. A Comparative Study of CDL/TDL Channel Models in 5G-mmWave Networks. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. Cham, 2026. P. 165–179. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-032-15154-4_13 (дата звернення: 15.04.2026).