ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра мобільних та відеоінформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **«МЕТОДИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ»**

на здобуття освітнього ступеня магістр
за спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка

освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Микита ВОВКОТРУБ
(підпис) *(ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)*

Виконав: здобувач вищої освіти гр.АРДМ-61
Микита ВОВКОТРУБ
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник: Наталія РУДЕНКО
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент: В. В. Вишневський
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Київ 2024

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій
Ступінь вищої освіти «Магістр»
Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна прорама Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедрою МВТ
Наталія РУДЕНКО
« » 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Вовкотрубу Микиті Анатолійовичу

1.Тема кваліфікаційної роботи: «Метод впровадження технологій мобільного зв'язку п'ятого покоління на основі теорії поширення радіохвиль»,
Керівник кваліфікаційної роботи Наталія РУДЕНКО, к.т.н., доцент
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 15.10.2024 р. №320

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2024р.

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи:
1. Архітектури мережі 5G.
2. Принципи розповсюдження радіохвиль.
3. Програмне забезпечення.
4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
1. Аналіз поточного стану та перспективи розвитку технології 5G в Україні і світі.
2. Дослідження особливостей реалізації мережі та характеристики міліметрового діапазону частот.
3. Моделювання каналу міліметроводіапазонута огляд системи.

5.Перелік ілюстраційного матеріалу: презентація

6. Дата видачі завдання 15.10. 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір літератури	17.10.24	Виконано
2.	Огляд сучасного стану технологій безпроводового зв'язку	23.10.24	Виконано
3.	Аналіз перспектив розвитку технологій 5G в Україні та світі.	08.11.24	Виконано
4.	Аналіз ключових особливостей реалізації мереж та характеристики міліметрового діапазону частот	15.11.24	Виконано
5.	Практичне моделювання	29.11.24	
7.	Розробка презентації, доповіді.	11.12.24	Виконано
8.	Оформлення магістерської роботи	20.12.24	Виконано

Здобувач вищої освіти _____ Микита ВОВКОТРУБ
(підпис) *(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувач вищої освіти Вовкотруб Микита Анатолійович
на тему: Метод впровадження технологій мобільного зв'язку п'ятого покоління на основі теорії поширення радіохвиль

Актуальність:
За останні 20 років бездротовий зв'язок стрімко розвивається, і впровадження міліметрових хвиль (mmWave) стало ключовим етапом у цій сфері. mmWave визнано перспективною технологією для 5G і Інтернету речей (IoT), що забезпечить підтримку великих обсягів даних, масове підключення, високу якість обслуговування, енергоефективність, надійність і низьку затримку. Широкий спектр мм-хвиль і впровадження малих комірок із сучасними методами обробки сигналів створять небачену ємність для майбутніх бездротових мереж, відповідаючи зростаючим вимогам до пропускної здатності.

Позитивні сторони:
1. Результати в магістерській кваліфікаційній роботі демонструють, що зв'язок mmWave можливий для всіх розгортань 5G у діапазоні мікросот до 100 м для таких частот, як 73ГГц, і до 500м для нижчих частот, таких як 4ГГц, які використовуються в густонаселених міських районах.
2. Зміст магістерської роботи повністю відповідає заданій темі, а всі поставлені завдання виконані в повному обсязі.

Недоліки:
1. Не достатньо уваги приділено питанню, а саме на базі якого обладнання реалізується мережа 5G.
2. Робота виконана у модельній формі, не привязана до певного місця чи регіону.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку "відмінно", а здобувач Вовкотруб Микита Анатолійович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Рецензент: ДТН професор _____ В. В. Вишківський
(науковий ступінь, вчене звання) *(підпис)* *(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально–науковий інститут Телекомунікацій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ДЕРЖАВНОЇ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістр

Направляється здобувач Вовкотруб М.А. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення
(назва)
на тему: «Метод впровадження технологій мобільного зв'язку п'ятого покоління на основі теорії поширення радіохвиль»

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

В.о. директора ННІТ _____ Катерина НЕСТЕРЕНКО
(підпис) *(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Вовкотруб Микита Анатолійович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з програмно-апаратними засобами мобільного зв'язку, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Вовкотруба Микити Анатолійовича на оцінку "відмінно", та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з електронних комунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«___» _____2024 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Вовкотруб М.А. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедрою
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«___» _____2024 року

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття ступня магістра: 67 стор., 32 рис., 8 табл., 31 джерело.

Мета роботи - дослідження та реалізація інноваційних рішень для вирішення проблем, пов'язаних із сильним загасанням, конструкцією антени та обмеженням характеристик розповсюдження для систем і програм із підтримкою 5G mmWave

Об'єкт дослідження – процес підвищення показників якості систем і програм із підтримкою 5G mmWave

Предмет дослідження – антенні решітки для використання в портативних пристроях і системах mmWave

Короткий зміст роботи: В магістерській роботі досягнуто наступних результатів:

1. У першому розділі досліджено поточний стан та перспективи розвитку технології 5G в Україні та світі. Також проведено аналіз ключових особливостей реалізації мережі та розглянуто характеристики міліметрового діапазону частот, в якому реалізується предача даних в мережі 5G.

2. У другому розділі досліджено характеристики розповсюдження мм-хвиль і представлені результати дослідження моделювання на частотах 4 ГГц, 28 ГГц і 73 ГГц для 5G Cellular у густонаселеному міському середовищі.

3. У третьому розділі порівнюється спрямоване та всенаправлене розповсюдження у відносно меншій мікроелементі з осередком у 5 разів більшим, щоб спостерігати відмінності продуктивності та характеристики різних частот мм-хвиль зі збільшенням відстані Tx-Rx.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЧАСТОТА, РАДІОХВИЛЯ, ТЕХНОЛОГІЯ, МЕТОД, АРХІТЕКТУРА, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, МОДУЛЬ, СИМУЛЯЦІЯ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, ПОХИБКА, ДІАПАЗОН.

ABSTRACT

The text part of the qualification work for obtaining a master's degree: 67 pages, 32 figures, 8 tables, 31 sources.

Objective of the work – research and implementation of innovative solutions to address issues related to severe attenuation, antenna design, and propagation characteristic limitations for systems and applications supporting 5G mmWave.

Object of the study – the process of enhancing the quality metrics of systems and applications with 5G mmWave support.

Subject of the study – antenna arrays for use in portable devices and mmWave systems.

Summary of the work: The following results were achieved in the master's thesis:

1. The first section examines the current state and prospects for the development of 5G technology in Ukraine and the world. An analysis of the key features of the network implementation is also carried out and the characteristics of the millimeter wave frequency range in which data transmission is implemented in the 5G network are considered.

2. The second section examines the characteristics of mm-wave propagation and presents the results of a modeling study at frequencies of 4 GHz, 28 GHz and 73 GHz for 5G Cellular in a densely populated urban environment.

3. The third section compares directional and omnidirectional propagation in a relatively smaller microcell with a cell 5 times larger in order to observe the differences in performance and characteristics of different mm-wave frequencies with increasing Tx-Rx distance.

KEYWORDS: FREQUENCY, RADIO WAVE, TECHNOLOGY, METHOD, ARCHITECTURE, SOFTWARE, MODULE, SIMULATION, EFFICIENCY, ERROR, RANGE.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....9
ВСТУП.....10
РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТОЧНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІ 5G В УКРАЇНІ ТА СВІТІ.....12
1.1 Поточний стан впровадження технологій 5G.....12
1.1.1 Впровадження технологій 5G в Європі.....15
1.1.2 Спеціалізація технологій 5G в країнах Європи.....17
1.1.3 Застосування 5G мережі в Україні.....24
1.2 Аналіз перешкод при розгортанні мереж 5G.....26
1.3 Перспективні напрямки використання 5G.....27
РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД КЛЮЧОВИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕРЕЖІ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ.....33
2.1 Дослідження ключових технології для реалізації мережі.....33
2.2 Огляд архітектури базової мережі 5G.....44
2.3 Стандартизація та випробування технології.....47
2.4 Комунікації на міліметровому діапазоні.....50
2.4.1 Аналіз характеристик міліметрового діапазону.....51
2.4.2 Поширення хвиль міліметрового діапазону.....54
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ТА ОГЛЯД СИСТЕМИ.....57
3.1 Модель каналу міліметрової хвилі.....57
3.2 Дослідження конструкції системи.....61
3.3 Оцінка ефективності та порівняння продуктивності.....65
3.3.1 Налаштування симуляції.....65
3.3.2 Результати моделювання.....66
ВИСНОВКИ.....75
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....77
ДЕМОНСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ (Презентація).....80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

5G - Fifth Generation;

BER - Bit Error Rate;

BF - Beamforming;

CI - Close in;

D2D - Device-to-Device;

ETSI - European Telecommunications Standards Institute;

FSL - Free-Space Loss;

HetNet - Heterogeneous Network;

LOS - Line-of-Sight;

METIS - Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society;

MIMO - Multiple-Input Multiple-Output;

mmWave - Millimeter Wave;

MPC - Multipath component;

NLOS - Non-Line-of-Sight;

O2i - Outdoor-to-indoor;

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing;

PDP - Power delay Profile;

PL - Path Loss;

PLE - Path Loss Exponent;

PTP - Point-to-Point;

QoS - Quality of Service

RX - Receiver;

SCM - Special Channel Model;

SNR - Signal-to-Noise-Ratio;

WLAN - Wireless Local Area Network;

ISD - Inter site Distance.

ВСТУП

Актуальність теми. За останні два десятиліття бездротовий зв'язок став свідком дуже швидкого розвитку та став поширеним у нашому світі. Найновішою розробкою в цій галузі є застосування діапазону міліметрових хвиль (mmWave) в існуючих і нових розгортаннях бездротових систем. Недавні дослідження показують, що експоненціальне зростання попиту на трафік даних продовжиться в наступне десятиліття.

У численних недавніх дослідженнях майбутніх мобільних комунікацій було розглянуто та запропоновано зв'язок mmWave як ключову сприятливу технологію для реалізації Інтернету речей (IoT) в епоху 5G і за її межами. Очікується, що мережа 5G підтримуватиме надзвичайно великі обсяги даних бездротового трафіку та реалізовуватиме масове підключення, забезпечуючи при цьому кращу якість обслуговування, енергоефективність та надійність, а також меншу затримку зв'язку. Величезний обсяг спектру в мм-діапазонах хвиль, який є незрівнянним у порівнянні з діапазонами нижче 6 ГГц, разом із запровадженням малих комірок і передових методів обробки сигналів забезпечить безпрецедентну ємність радіоресурсів для 5G і поза межами бездротових мереж і задовольнить потребу в пропускній здатності для трафіку у майбутньому.

Мета роботи - дослідження та реалізація інноваційних рішень для вирішення проблем, пов'язаних із сильним загасанням, конструкцією антени та обмеженням характеристик розповсюдження для систем і програм із підтримкою 5G mmWave

Для досягнення поставленої мети у магістерській атестаційній роботі було розроблено та виконано такі завдання:

- Аналіз поточного стану та перспективи розвитку технології 5G в Україні і світі;
- Дослідження особливостей реалізації мережі та характеристики міліметрового діапазону частот;
- Моделювання каналу міліметроводіапазонута огляд системи.

Об'єкт дослідження – процес підвищення показників якості систем і програм із підтримкою 5G mmWave

Предмет дослідження – антенні решітки для використання в портативних пристроях і системах mmWave

Методи дослідження. У роботі було застосовано теорія розповсюдження радіохвиль, математичного та програмного моделювання .

Наукова новизна одержаних результатів. Результати в магістерській кваліфікаційній роботі демонструють, що зв'язок mmWave можливий для всіх розгортань 5G у діапазоні мікросот до 100 м для таких частот, як 73ГГц, і до 500м для нижчих частот, таких як 4ГГц, які використовуються в густонаселених міських районах.

Теоретична, методична та практична значущість отриманих результатів.

У магістерській роботі представлено процедуру зв'язок міліметрових хвиль (mmWave) як ключову сприятливу технологію для реалізації масового зв'язку в епоху 5G і за її межами.

Апробація результатів та публікації. Основні результати магістерської роботи були представлені та обговорені на двох науково-практичних конференціях. До того ж, на основі матеріалів дослідження опубліковано статтю в науковому журналі.

РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТОЧНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІ 5G В УКРАЇНІ ТА СВІТІ

1.1. Поточний стан впровадження технологій 5G

Згідно з прогнозами, кількість абонентів 5G у світі зросте з 12 мільйонів 2019 року до 4 мільярдів у 2027 році. Водночас більша кількість споживачів буде в Північно-Східній Азії, Південно-Східній Азії, Індії, Непал і Бутан, рис.1.1.[1].

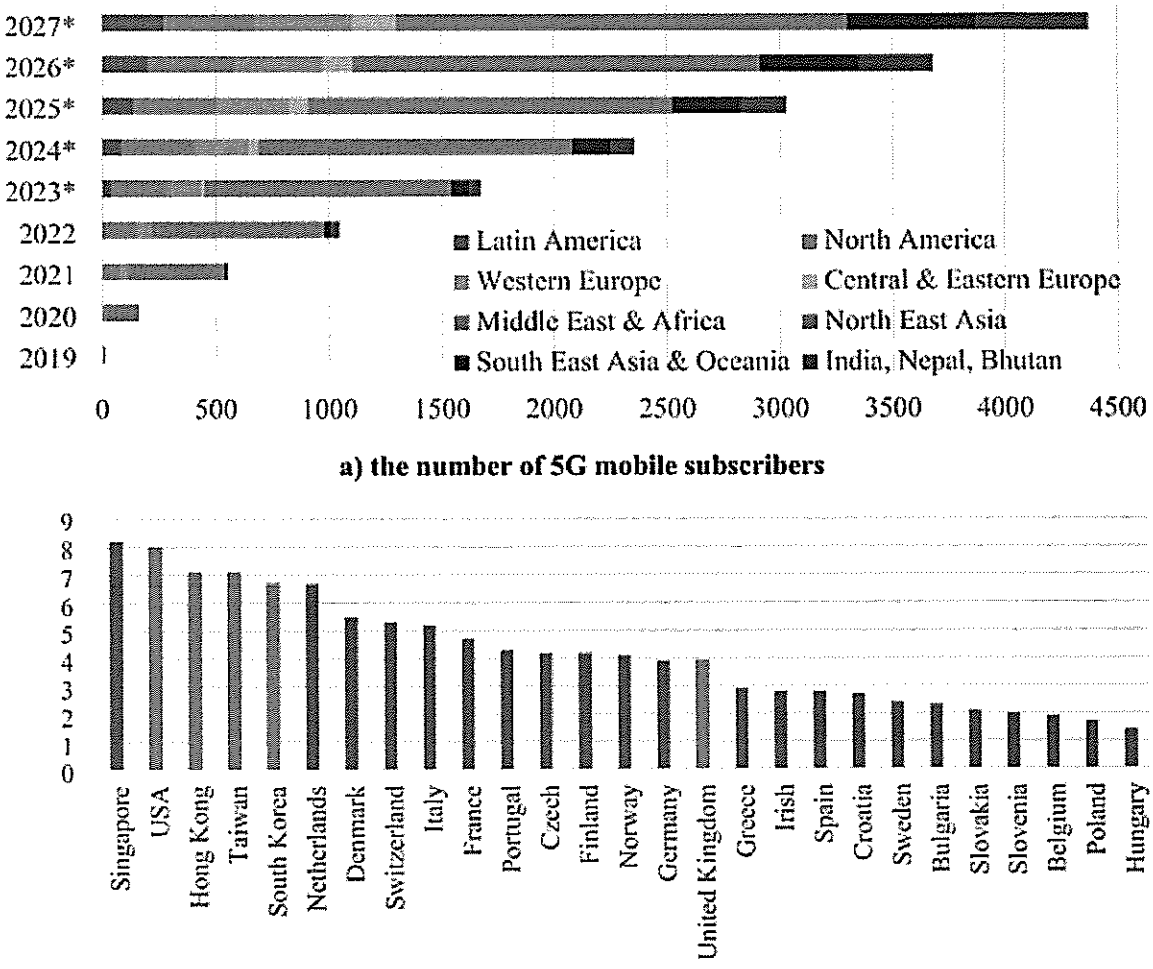


Рис. 1.1. Кількість абонентів 5G у світі

У 2019 році технології мобільного зв'язку 5G були присутні переважно в Північно-Східній Азії. Частка цього регіону залишиться найвищою у 2027 р. — 39,01%, але не лише через високу чисельність населення — сьогодні в цьому

регіоні проживає п'ята частина жителів світу (ООН 2023), а й через високі темпи економічного та технологічний розвиток. Примітно, що другу частку за кількістю передплатників займуть Південно-Східна Азія та Океанія (за прогнозом, 13,07% у 2017 році), далі Індія, Непал і Бутан (11,39%) і лише потім Західна Європа (10,02%) і Північної Америки (9,15 %). Покриття мережі 5G є важливою характеристикою розвитку національної економіки. У країнах із високим покриттям 5G компанії охочіше користуватимуться перевагами нових технологій. Лідерами за охопленням є США та деякі країни Азії. Водночас у країнах Європейського Союзу ряд країн також мають високий рівень показника.

Якщо говорити про патенти на технології 5G, то велика частка належить китайським правовласникам і південнокорейським компаніям [2]. Далі мною розглянуто патенти на технологію 5G за країнами та власниками авторських прав рис.1.2.

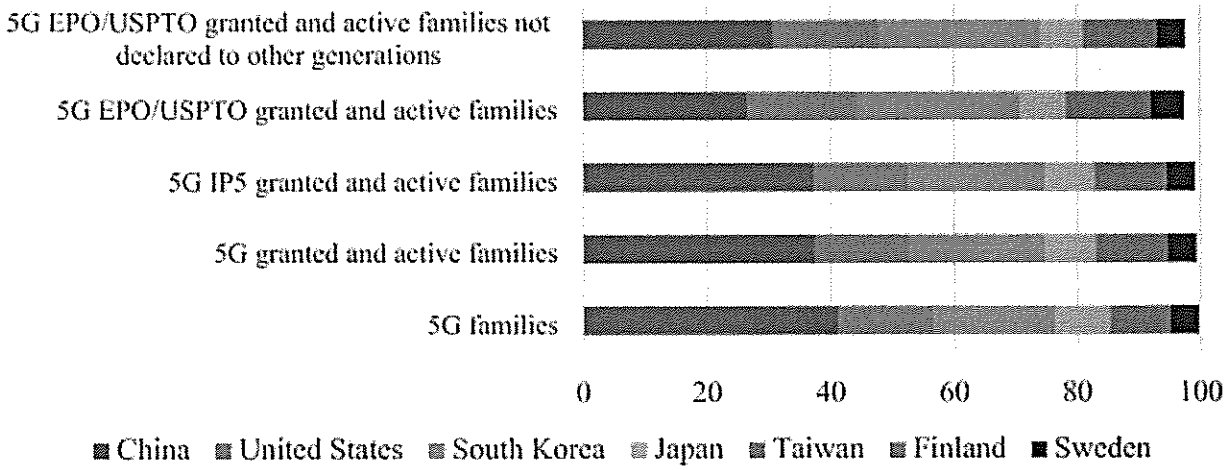


Рис. 1.2. Патенти на технологію 5G за країнами та власниками авторських прав

Як зазначалося раніше, в цілому Китай і Південна Корея лідирують за кількістю патентів на технології 5G. Далі йдуть США з часткою 15,34%, Японія (8,86%), Фінляндія (8,34%), Швеція (4,69%) і Тайвань (1,45%). У групі «5G надані та активні сім'ї» Фінляндія трохи випереджає Японію за часткою патентів, позиція

інших країн практично не змінюється. Подібна ситуація відбувається в групі «5G IP5 надано та активні родини».

У групі «5G EPO/USPTO, надані та активні родини» частки Китаю та Південної Кореї майже рівні — близько 26%. Трохи вище, ніж в інших групах, частки США, Швеції та Тайваню. Подібна ситуація для групи «5G EPO/USPTO надано та активні родини, не оголошені іншим поколінням» [2].

Патенти на технологію 5G розподіляються між провідними компаніями так: Huawei (Китай) — 3147 патентів, Samsung (Південна Корея) — 2795, ZTE (Китай) — 2561, LG (Південна Корея) — 2300, Nokia (Фінляндія) — 2149, Ericsson (Швеція) — 1494, Qualcomm (США) — 1293, Intel (США) — 870 (за даними Global number…, 2020).

Розподіл патентів за основними компаніями та технологіями 5G показано на рис. 1.3.

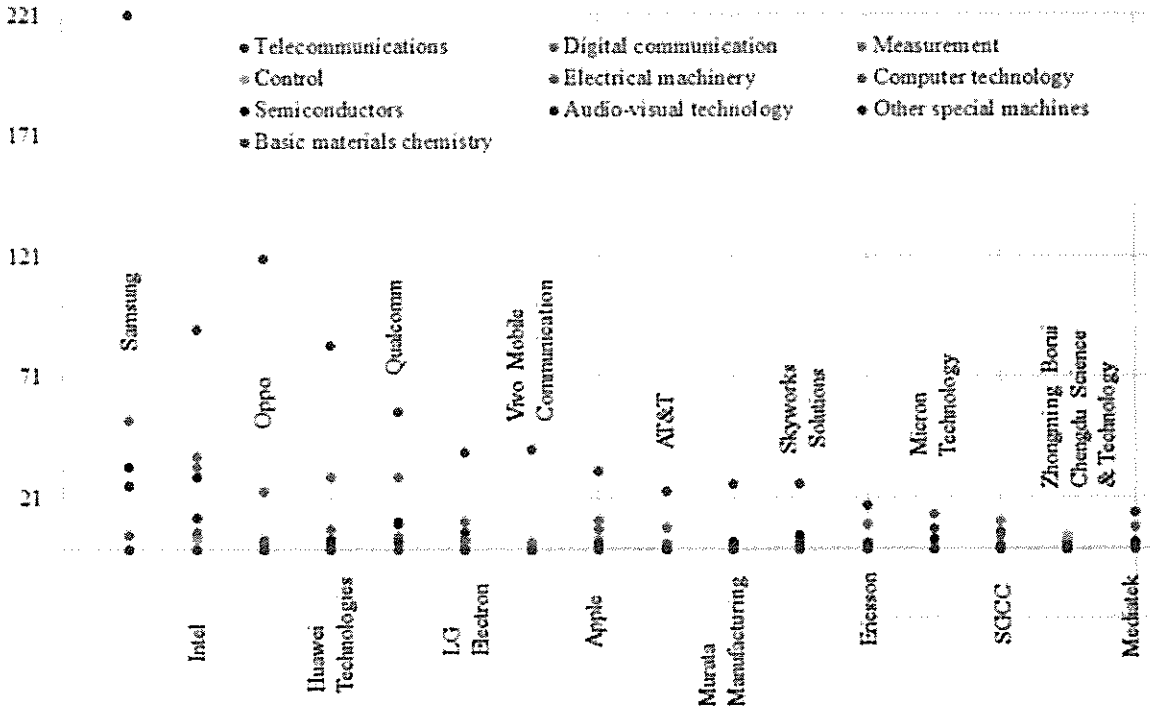


Рис. 1.3. Розподіл патентів за основними компаніями та технологіями 5G

У представленій вибірці патентів можна відзначити явне лідерство Samsung — 372 патенти або 26,1% аналізованої сукупності, Intel — 222 або 15,6%, Oppo —

152 або 10,7%, Huawei Technologies — 134 або 9,4% і Qualcomm — 123 або 8,6 відсотка. Більше половини всіх патентів (57,19%) припадає на сферу телекомунікацій. Іншими основними напрямками є цифровий зв'язок (16,28%), комп'ютерні технології (8,42%) і напівпровідники (6,67%).

1.1.1. Впровадження технологій 5G в Європі

Країни Європейського Союзу (ЄС) представляють особливий інтерес до розвитку технологій 5G, оскільки для них, поряд із заходами національної підтримки, існує єдина інноваційна політика, яка враховує регіональні особливості, наприклад, програма «Горизонт 2020». . Незважаючи на те, що у великій кількості наукових праць приділяється увага розвитку інновацій і технологій у країнах ЄС, існує дефіцит порівняльних досліджень, присвячених їх технологічній спеціалізації у сфері 5G [3].

Розробка політики 5G в ЄС почалася в 2013 році після підписання угоди між Європейською комісією та 5G Infrastructure Association (5G-IA), яка передбачала підтримку проектів великих гравців галузі у формі державно-приватного партнерства. Так, до 2018 року інвестиції в проекти з поширення 5G через програму Horizon 2020 склали 700 млн євро, а загальний обсяг державного фінансування – 4 млрд євро. Крім того, у цей же період Єврокомісія розробила стратегічний план «5G для Європи: план дій» до 2025 року, який передбачав створення національних дорожніх карт для переходу на зв'язок 5G, стандартизацію технологій та залучення додаткових коштів у підтримувати галузь. Тим не менш, за словами дослідників, незважаючи на те, що в ЄС була створена спільна структура заходів для підтримки розвитку 5G, на рівні окремих країн спостерігалися значні відмінності в цій сфері через відсутність єдиних стандартів, вимог і відповідні бізнес-моделі.

Проблеми розвитку технологій 5G в ЄС також розглядаються в науковій літературі з точки зору підтримки конкурентоспроможності країн на глобальному ринку та зменшення залежності від імпортних рішень. Так, аналіз індексу технологічного суверенітету 5G (TSI) для ЄС показав, що європейські країни мають

слабкий ступінь технологічного суверенітету порівняно з Китаєм і США через брак спеціалізованого людського капіталу та тенденцію аутсорсингу у відповідних сферах. технологічні сегменти. Вивчення кейсів ключових гравців ринку 5G в ЄС дозволило дослідникам прийти до висновку, що до 2018 року технологічним лідером європейського ринку була китайська компанія Huawei, яка після введення обмежень на діяльність втратила свої позиції. фінській компанії Nokia та шведській компанії Ericsson. Це дозволило ЄС розвинути технологічні переваги в певних сферах.

Говорячи про технологічну диверсифікацію в ЄС, варто зазначити, що країни мають політику «розумної спеціалізації», яка покликана стимулювати розвиток більш складних технологій у регіонах ЄС. Це вигідно для країн з точки зору довгострокового економічного зростання, але впровадження політики є складним, оскільки менш економічно розвинені регіони ЄС віддають перевагу спеціалізації на менш наукомістких технологіях.

Таким чином, на основі наявних досліджень можна зробити висновок, що для оцінки перспектив розвитку 5G в ЄС необхідний аналіз різноманітності та повсюдності технологій, пов'язаних із цим поколінням мобільного зв'язку [4].

База даних Європейського патентного відомства (EPO) використовувалася для визначення ключових технологій 5G у країнах ЄС. За період 2012–2021 рр. за запитом «5G OR Fifth generation» було вивантажено 753 062 патенти для 23 країн, з яких потім було відібрано 74 940 патентів для трьох ключових груп технологій 5G, згаданих у науковій літературі та ідентифікованих на основі Спільної патентної класифікації (CPC): H01 (Основні електричні елементи), H04 (Технологія електричного зв'язку), G06 (Обчислення; обчислення; підрахунок). Для кожної технологічної групи були визначені найпоширеніші підгрупи табл.1.1.

Таблиця 1.1.

Класифікація ключових технологій 5G

Група	Підгрупа	Технології
H01.Основні електричні елементи	H01L	Напівпровідникові прилади, електричні твердотілі пристрої
	H01M	Процеси або засоби, наприклад батареї, для прямого перетворення хімічної енергії в електричну
	H01Q	Антени, тобто радіоантени
H04. Техніка електрозв'язку	H04B	Спосіб передачі
	H04J	Мультиплексний зв'язок
	H04L	Передача цифрової інформації, наприклад телеграфний зв'язок
	H04M	Телефонний зв'язок
	H04N	Зображувальне спілкування, наприклад телебачення
	H04W	Безпроводові мережі зв'язку
G06. Обчислювальна техніка, розрахунковий , підрахунок.	G06F	Електрична цифрова обробка даних
	G06K	Графічне зчитування даних, представлення даних, носії запису, поводження з носіями запису
	G06N	Обчислювальні механізми на основі конкретних обчислювальних моделей
	G06Q	Іноваційні та комунікаційні технології, спеціально адаптовані для адміністрованих, комерційних, фінансових або наглядових цілей
	G06T	Обробка або генерація даних зображення
	G06V	Розпізнавання або розуміння зображення чи відео

1.1.2. Спеціалізація технологій 5G в країнах Європи

За період з 2012 по 2021 рік кількість щорічно зареєстрованих патентних заявок на технології 5G в країнах Європи поступово зросла в середньому на 11%, як видно з рис. 1.4 . Пік патентної активності припав на 2021 рік, коли було зареєстровано 126 563 патенти [5].

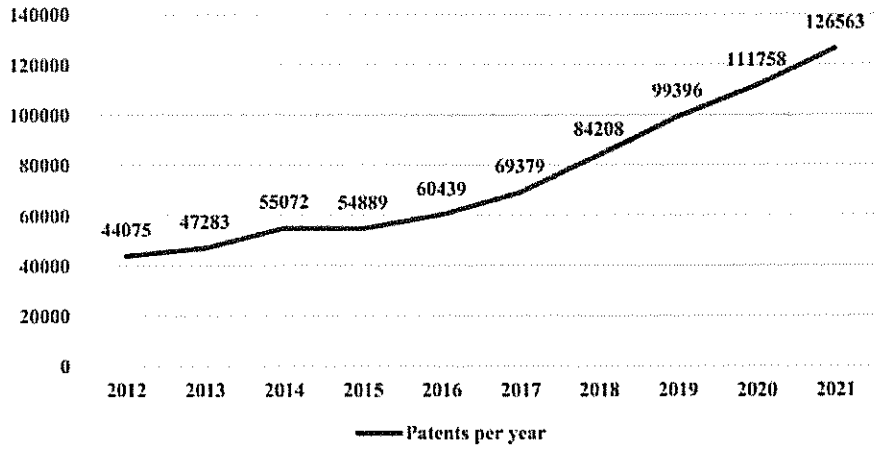


Рис. 1.4. Кількість щорічно зареєстрованих патентних заявок на технології 5G в країнах Європи

Розподіл кількості патентів на окремі технології серед країн ЄС у порівнянні з лідерами у сфері 5G (США, Китай та Республіка Корея) наведено на рис. 1.5 . Слід зазначити, що найбільша кількість патентів спостерігається у секторі Бездротові мережі зв'язку (38,96%), Передача цифрової інформації, наприклад телеграфного зв'язку (25,19%) та Електрична цифрова обробка даних (13,26%). У 2012–2017 роках на патенти США, Китаю та Республіки Корея припадало понад 80% усіх винаходів, пов'язаних із цими технологіями, тоді як країни ЄС не мали настільки ж значних результатів і не перевищували в середньому 13,20% [5].

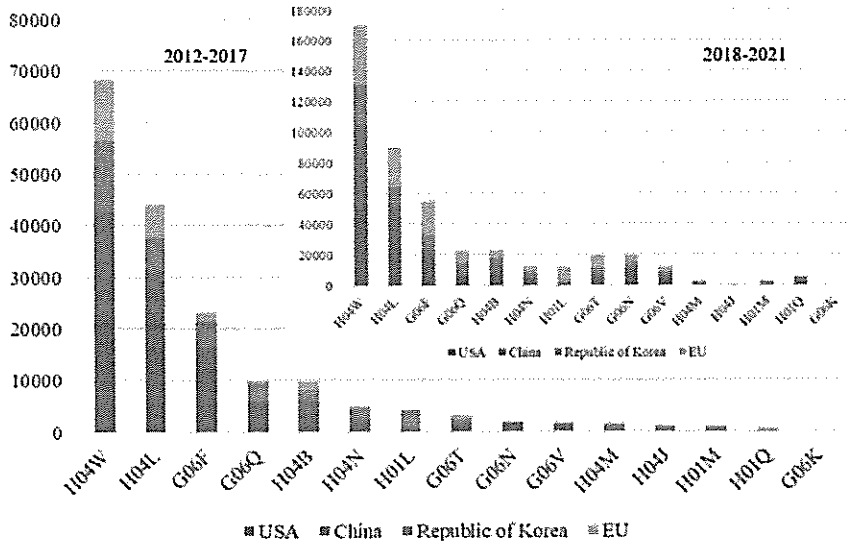


Рис. 1.5. Розподіл кількості патентів на окремі технології серед країн ЄС у порівнянні з лідерами у сфері 5G

Проте з 2018 року, коли діяльність Huawei на європейському ринку була обмежена, відбулися помітні структурні зміни в розподілі ключових груп технологій 5G. Перш за все, частка європейських патентів зросла в усіх технологічних сферах, склавши в середньому 32,70%, і досягла найвищого значення в напівпровідникових приладах; електричні твердотільні пристрої (78,62%). По-друге, протягом цього періоду спостерігалося зростання кількості заявок на отримання патентів у сферах обробки або генерації даних зображень (1,74% від загальної кількості у 2012–2017 рр. проти 4,36% від загальної кількості у 2018–2021 рр.), обчислювальних механізмів на основі конкретних обчислювальні моделі (1,10% проти 4,28%) і розпізнавання або розуміння зображень або відео (0,98% проти 2,74%) [6].

На рис.1.6 нижче показано ключові лідери за кількістю зареєстрованих патентних заявок на технології 5G серед країн Європейського Союзу. За аналізоване десятиріччя найбільша активність у розробці інновацій спостерігається у Швеції (30,34% від загальної кількості європейських патентів), Німеччині (21,46%), Фінляндії (18,88%), Франції (12,60%), Нідерландах (5,20%) та Ірландії (4,12%).

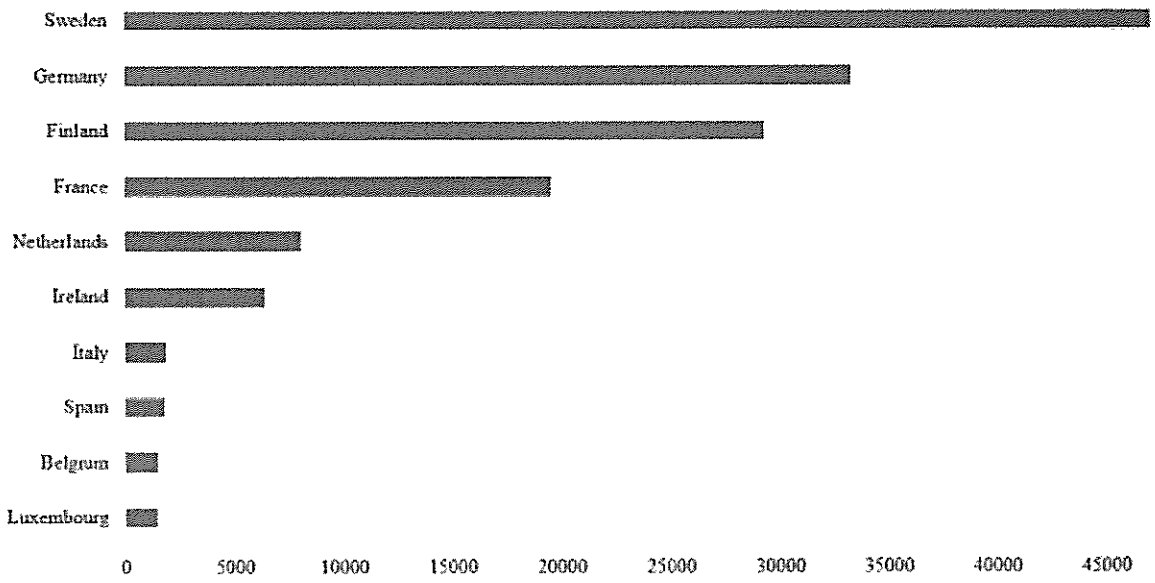
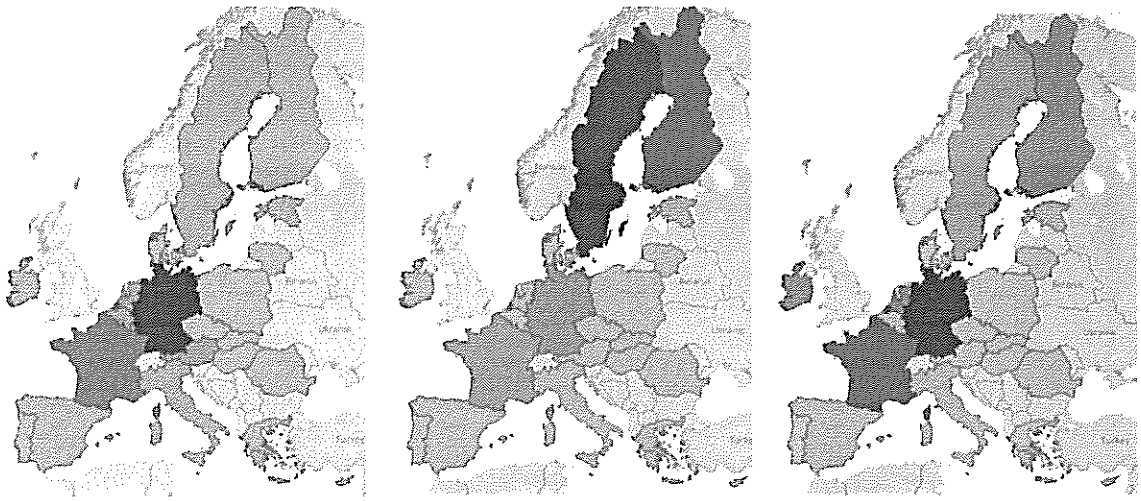


Рис. 1.6. Лідери за кількістю зареєстрованих патентних заявок на технології 5G серед країн Європи

Однак цікаво відзначити, що розподіл патентів, пов'язаних із трьома ключовими секторами технології 5G, суттєво відрізнявся в Європейському Союзі в 2012–2021 роках рис.1.7.



a) H01. Basic electric elements b) H04. Electric communication technique c) G06. Computing; calculating; counting

Рис. 1.7. Розподіл патентів, пов'язаних із трьома ключовими секторами технології 5G

Бачимо, що в Basic лідирують Німеччина (49,37% від загальної кількості патентів), Франція (17,17%), Австрія (7,71%), Нідерланди (6,45%), Бельгія (5,51%) і Люксембург (5,37%). сектор електроелементів (H01) за аналізований період. Швеція (46,37%), Фінляндія (26,31%), Німеччина (11,3%), Франція (8,61%) і Нідерланди (2,16%) виділяються в секторі електрозв'язку (H04). У такому секторі розвитку технології 5G, як обчислювальна техніка; розрахунковий; ураховуючи (G06), найбільшу частку патентів займають Німеччина (34,15%), Франція (19,15%), Нідерланди (10,75%), Ірландія (9,94%), Фінляндія (8,98%) і Швеція (6,29%).

Розрахунок RCA до та після 2018 року дозволив визначити технології, в яких країни ЄС мають найбільший потенціал, та порівняти їх із країнами-лідерами у сфері 5G рис.1.8. Зокрема, у 2012–2017 рр. найбільшу кількість спеціалізацій спостерігали в таких країнах, як Республіка Корея (7 спеціалізацій), Фінляндія (7 спеціалізацій), Ірландія (7 спеціалізацій), Нідерланди (6 спеціалізацій) та США (6). спеціалізації). Водночас інші країни Європи мали менш різноманітні технологічні

профілі — мінімальні значення показника були в Чехії (1 спеціалізація), Мальті (1 спеціалізація), Австрії (2 спеціалізації), Данії (2 спеціалізації). Проте з 2018 року технологічна спеціалізація більшості країн стала більш явною. Так, найбільше зростання коефіцієнта RCA порівняно з попереднім періодом спостерігалося для Литви (з 0 до 6 спеціалізацій), Португалії (з 2 до 7 спеціалізацій), Німеччини (з 4 до 8 спеціалізацій) та Естонії (з 4 до 8 спеціалізацій). Навпаки, Китай і США продемонстрували менш різноманітні технологічні профілі [7].

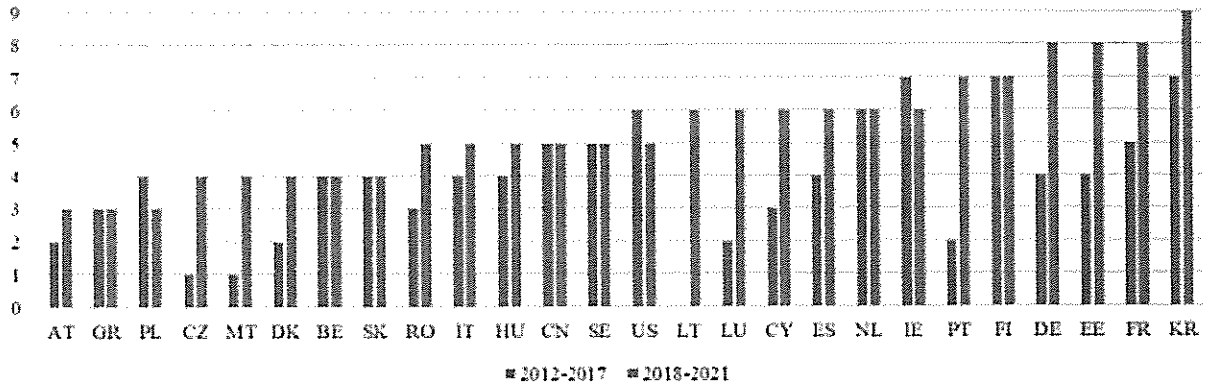


Рис. 1.8. Технології, в яких країни ЄС мають найбільший потенціал, та порівняти їх із країнами-лідерами у сфері 5G

Тим не менш, в останні роки через підвищену зацікавленість урядів у підтримці розвитку мереж 5G і збільшення кількості заявок на патенти в Європейському Союзі можуть з'явитися нові лідери в цій технологічній галузі. Наприклад, у 2021 році найбільш диверсифікований технологічний профіль був в Іспанії (11 спеціалізацій), де Міністерство економіки та цифрової трансформації запровадило програму UNICO I + D для посилення досліджень, розробок та інноваційних дій національних компаній і виділило 15 мільйонів євро до створення мереж 5GВиноска7 (OECP, 2023). Високі значення індексу різноманітності у 2021 році також спостерігаються в Бельгії (10 спеціалізацій), Австрії (9 спеціалізацій) та Данії (9 спеціалізацій) рис.1.9.

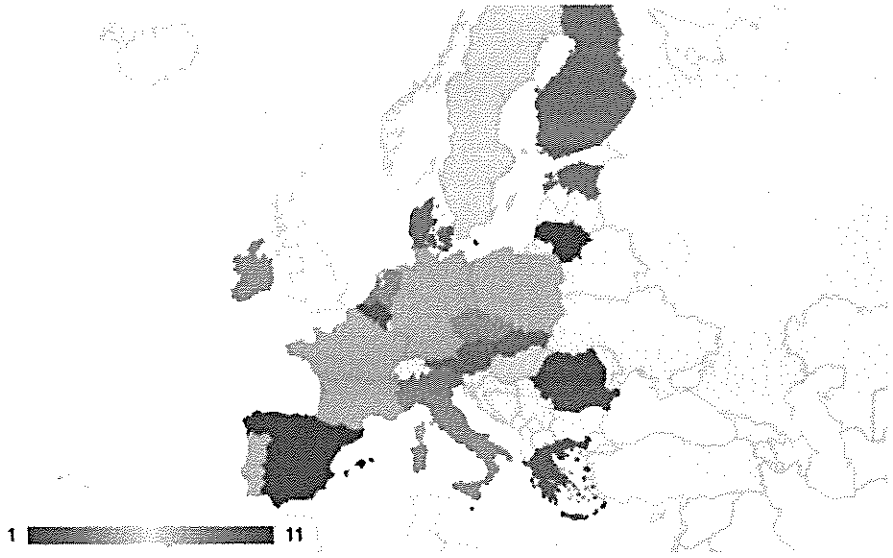


Рис. 1.9. Значення індексу різноманітності

Так, останнім часом країни ЄС спеціалізуються переважно на технологіях, пов'язаних з аналізом та використанням різних типів даних, отриманих із мереж 5G: інформаційно-комунікаційні технології [ІКТ], спеціально адаптовані для адміністративних, комерційних, фінансових, управлінських чи наглядових цілей; Електрична цифрова обробка даних і обробка або генерація даних зображень. Водночас технології, необхідні для роботи обладнання 5G (мультиплексний зв'язок, батареї для прямого перетворення хімічної енергії в електричну енергію та передача), є рідкістю в країнах ЄС. Повсюдність технологічних спеціалізацій серед країн ЄС у 2021 році показано на рис.1.10 .

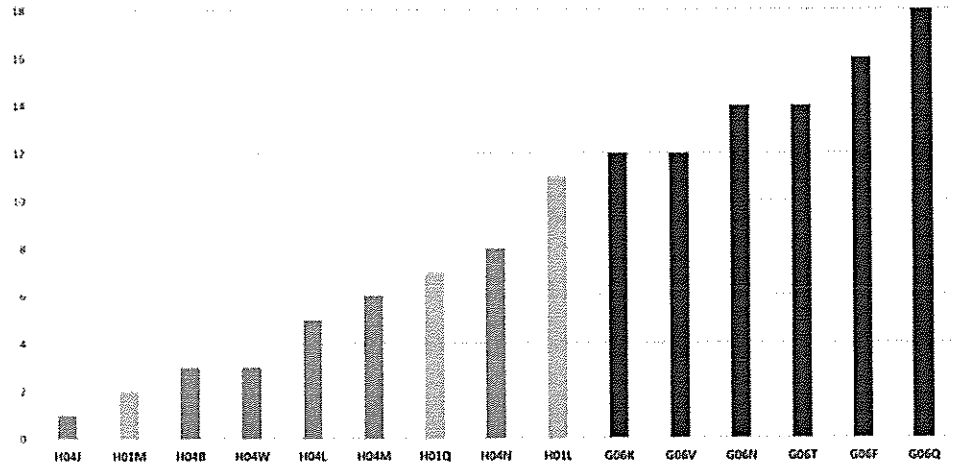


Рис. 1.10. Повсюдність технологічних спеціалізацій серед країн ЄС

Більш конкретно, відмінності між технологічними профілями окремих країн ЄС і лідерами в галузі 5G представлені на рис. 1.11 та рис. 1.12 . Наприклад, Франція, Естонія та Німеччина мають конкурентні переваги здебільшого в технологіях обробки даних. Основні електричні елементи та винаходи техніки електричного зв'язку майже не представлені в розглянутих країнах, за винятком акумуляторів для прямого перетворення хімічної енергії в електричну, графічного зв'язку, наприклад телебачення та передачі цифрової інформації.

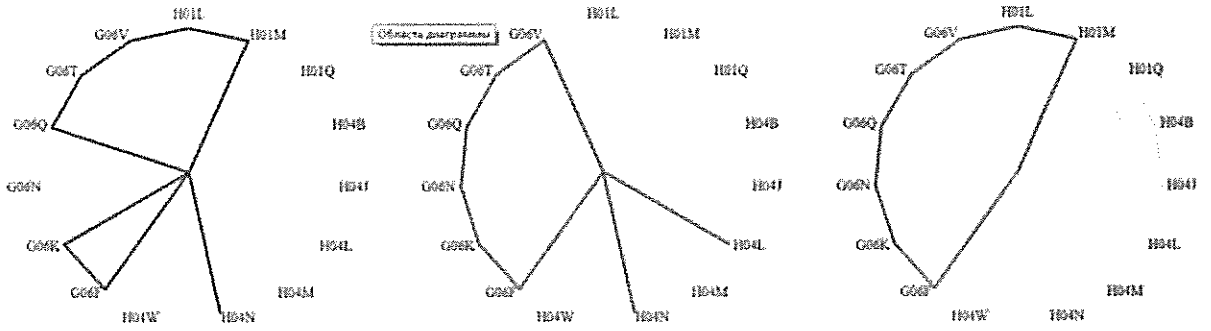


Рис. 1.11. Відмінності між технологічними профілями окремих країн ЄС в галузі 5G

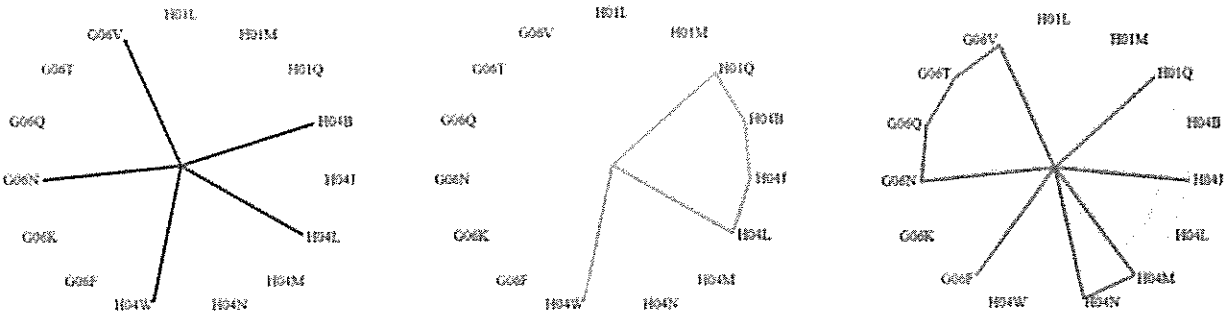


Рис. 1.12. Відмінності між лідерами в галузі 5G

Протилежне вірно для США, Китаю та Республіки Корея, технологічні профілі яких менш різноманітні, але включають винаходи, рідші для європейських країн — телефонний зв’язок, мультиплексний зв’язок, антени тощо. Цей факт свідчить про те, що незважаючи на зростання кількості спеціалізації в країнах ЄС, вони все ще потенційно не можуть запровадити технології 5G, окрім наявних

патентів світових лідерів, оскільки їм не вистачає власних винаходів, необхідних для створення інфраструктури 5G [7].

1.1.3. Застосування 5G мережі в Україні

В Україні вперше провели тестування мережі 5G завдяки співпраці між Vodafone Україна та Nokia. Тестовий зв'язок було встановлено між Інноваційним центром Промприлад в Івано-Франківську, київським офісом Vodafone та офісом Nokia у Гельсінкі. Результати тестування виявили високу якість зв'язку, підтверджуючи перспективи технології 5G для України.

Запуск 5G є значним кроком для технологічного розвитку України. Сьогодні мережа 5G активно використовується у більш ніж 90 країнах світу, а Європейський Союз прагне до 2025 року забезпечити 5G покриття у всіх містах і вздовж ключових транспортних маршрутів. Україна, попри виклики війни, також намагається рухатися в ногу зі світовими трендами.

Технологія 5G відкриває безліч переваг, включно з вищою швидкістю мобільного інтернету та здатністю підтримувати більше пристроїв одночасно. Це сприятиме розвитку смарт-міст, інновацій у промисловості та покращенню якості життя населення. Впровадження 5G стимулюватиме економіку, створюючи нові робочі місця та сприяючи розвитку цифрового сектору.

Для запуску 5G в Україні планується використовувати різні частотні діапазони:

- 700 МГц (n28): забезпечує великий радіус покриття та високу проникаючу здатність, що підходить для сільської місцевості та зон із щільною забудовою.

- 3.4-3.8 ГГц (n78): середньочастотний діапазон, який дає змогу забезпечити баланс між швидкістю передачі даних та зоною охоплення, особливо в міських та передміських районах.

- 26 ГГц (n258): діапазон високих частот (міліметрові хвилі), який дозволяє досягти надвисоких швидкостей, але має обмежений радіус дії, що підходить для густонаселених міських зон та специфічних об'єктів, як-от стадіони та аеропорти.

Також на ринку України слід відзначити компанію «Київстар»,які вже тестують мережу у лабораторних умовах.

Президент "Київстару" Олександр Комаров повідомив, що співпраця з компанією Rakuten буде реалізована у три етапи. Перший етап передбачає створення спільної лабораторії для запуску технології Open RAN. На другому етапі планується розгортання невеликої частини мережі з використанням Open RAN, що охоплюватиме 10-15 об'єктів.

«Третій етап включатиме масштабне впровадження цієї технології для подальшого запуску 5G. Вже наступного року ми зможемо продемонструвати перші результати, а до кінця 2024 або на початку 2025 року в нас буде активний сегмент мережі, що працюватиме в тестовому режимі на цій технології», — зазначив Комаров. За його словами, поки невідомо, коли саме в Україні буде впроваджено 5G.

Також Комаров повідомив про плани компанії досягти 98% покриття населення LTE-мережею до 2026 року. Наприклад, у Київській області покриття 4G вже становить 97%, а траса Київ-Чоп забезпечена 4G на 95%. Для досягнення повного покриття потрібно встановити ще кілька десятків технологічних майданчиків, що потребує забезпечення електроенергією та можливістю обслуговування на віддалених локаціях.

Також стало відомо, що впровадження 5G зв'язку сприятиме широкому використанню додатків віртуальної (VR), змішаної (XR) і доповненої (AR) реальності. Очікується, що преміум-смартфони з підтримкою 5G стануть більш доступними, а їхня вартість буде становити до 1000 доларів.

1.2. Аналіз перешкод при розгортанні мереж 5G

Далі мною виконано визначення основних труднощів та викликів, які виникають при розгортанні технології 5G.

1.Багато країн сьогодні потребують інвестицій для відновлення економіки та соціальної сфери після пандемії, переходу на відновлювані джерела енергії,

розвитку освіти та професійної підготовки. Розробка технологій 5G може бути дорогим процесом. Особливо це стосується географічно великих країн. Повне покриття вимагає встановлення великої кількості станцій і антен. Без вирішення проблем, накопичених раніше, населення цих країн не зможе отримати користь від цифрової революції. Попередньо менш розвинені країни світу можуть стати відстаючими в цій сфері [8].

2.Сучасна економіка, гнучкі та складні виробничі ланцюжки вимагають швидкої передачі великих обсягів даних. В таких умовах формування інфраструктури, що відповідає високим вимогам, стає не лише інженерним завданням, а й важливим економічним завданням.

3.Архітектурний зсув вимагає набагато більшої кількості сайтів. Це означає, що прискорений розвиток інфраструктури може потребувати державної підтримки у вигляді кредитів, субсидій,Виноска8 участь у формі державно-приватного партнерства та придбання об'єктів інфраструктури державними організаціями різного рівня — від місцевого до національного. Наприклад, Brake рекомендує, реалізуючи відповідну політику в США, не розглядати можливість створення загальнодоступної мережі, а краще зосередитися на забезпеченні сприятливих умов для приватного сектора при розгортанні мереж. Можна також припустити, що учасники ринку — постачальники послуг — можуть стати не тільки великими провайдерами, як це було в попередні покоління, але й невеликими фірмами і, навпаки, великими компаніями для задоволення своїх потреб у технології 5G. Таким чином, набір постачальників технологій стане більш різноманітним, що в майбутньому може позитивно вплинути на формування ціни для споживачів. Такий різний підхід до надання послуг або ведення бухгалтерського обліку тягне за собою наступну складність [9].

4.Необхідність урегулювання законодавчої бази також може бути актуальною через надання виділених частот для мобільних мереж 5G, які можуть бути зарезервовані для потреб різних відомств. Доступ до різних спектральних ресурсів, включаючи міліметрові хвилі (mmWave) між 24 і 86 ГГц, визначає, наскільки технології 5G зможуть задовольнити попит на послуги мобільної

передачі даних, а також послуги нових бездротових широкосмугових додатків. у свою чергу, вони розроблятимуть промислову автоматизацію, віртуальну та доповнену реальність.

5.Патентування. Зараз ведеться активна робота з дослідження, розробки і, як результат, патентування. Захист прав інтелектуальної власності стає важливим завданням розгортання технологій 5G. Динамічний характер сприятиме збільшенню кількості патентів у цій сфері, що посилить конкуренцію та розширить існуючий розрив між країнами-лідерами та аутсайдерами.

1.3. Перспективні напрямки використання 5G

У звіті про 5G IoT та приватний ринковий звіт 5G за 2024–2030 рр. наведено 15 випадків використання 5G IoT, визначених на основі 121 тематичного дослідження, які надано у файлі Excel, що супроводжує звіт.* Нижче наведено 5 найкращих випадків використання 5G у приватному секторі на основі кількості проекти, визначені для кожного випадку використання, і серед них більша важливість або роль приватного 5G у цих випадках використання [10].

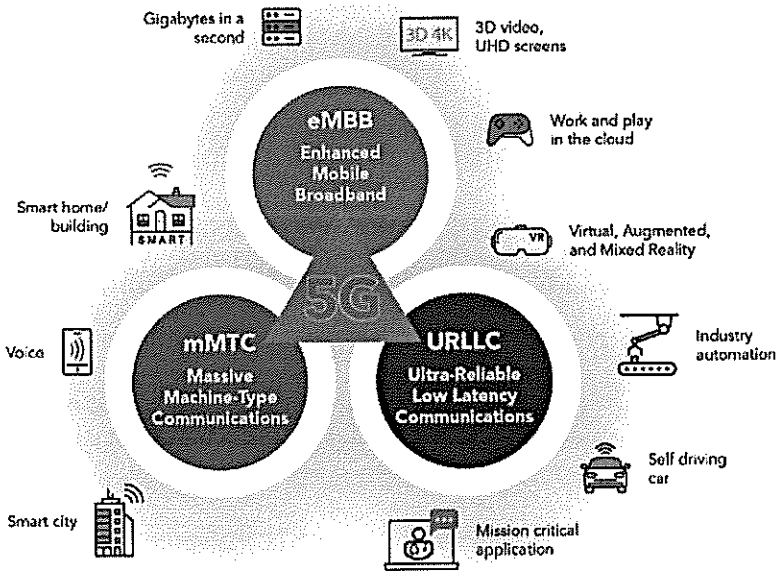


Рис. 1.13. Перспективні напрямки використання 5G

1. Віддалений контроль активів.

Швидкість приватної мережі 5G забезпечує зв'язок у реальному часі між віддаленими операторами та активами. Низька затримка та висока пропускна здатність 5G підтримують безперебійний зв'язок між віддаленими операторами та активами, забезпечуючи своєчасний і точний контроль операцій. Зокрема, приватна мережа 5G полегшує інтеграцію тактильних елементів керування та потокового відео для підвищення продуктивності під час віддалених операцій з активами. На наступному зображенні показано систему дистанційного керування мобільною машиною (активом) за допомогою тактильного зворотного зв'язку та відео. Контролер забезпечує оператору тактильний зворотний зв'язок і точне керування (з субміліметровою роздільною здатністю) [10].

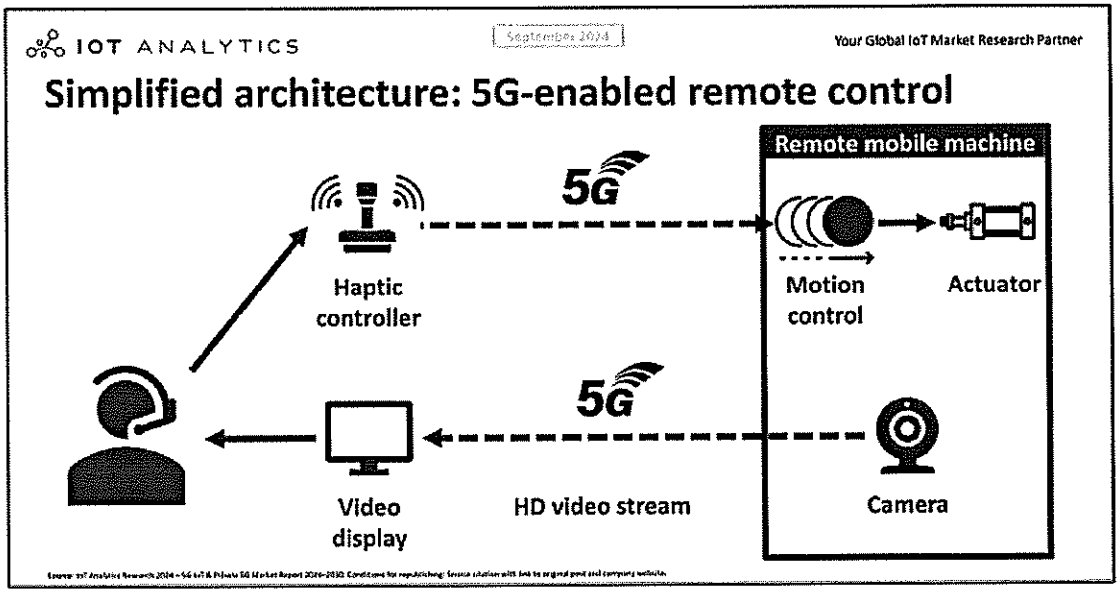


Рис. 1.14. Спрощена архітектура – дистанційне керування з підтримкою 5G

Приклади дистанційного керування активами за допомогою приватного 5G:

- У Катарі Hamad Port розгорнув приватну мережу 5G для різних портових додатків, включаючи дистанційне керування кранами та роботами на платформі з гумовими шинами для підвищення продуктивності.

- У Швеції виробник гірничодобувного та інфраструктурного обладнання Epiroc співпрацює з Ericsson , щоб надати приватні рішення 5G, щоб допомогти гірничодобувним компаніям автоматизувати та оцифрувати свої операції .

2. З'єднання та покриття закладу або кампусу.

Розгортання виділеної приватної мережевої інфраструктури для однієї організації, спрямоване на покращення підключення як для пристроїв IoT, так і для пристроїв, що не належать до IoT, і забезпечення безперебійного, високопродуктивного покриття мережі на всьому об'єкті чи кампусі, будь то в приміщенні чи на відкритому повітрі.

Private 5G надає організаціям виділене та ефективне підключення на їхніх сайтах. Висока швидкість передачі даних і наднизька затримка приватного 5G забезпечують безперебійну роботу на об'єктах або в кампусах (наприклад, для дистанційного керування обладнанням або систем моніторингу на території кампусу), що робить їх ідеальними для підключення та покриття в цих областях. Крім того, ці приватні мережі пропонують розширені можливості потокового відео, що робить високоякісні відеоконференції та обмін вмістом набагато плавнішим для роботи закладу [11].

Приклади підключення закладу чи кампусу та покриття за допомогою приватної мережі 5G:

- У Німеччині Lufthansa Technik , німецька компанія з технічного обслуговування, ремонту та капітального ремонту літаків, у 2020 році запустила приватну мережу 5G на своєму заводі з капітального ремонту авіаційних двигунів у Гамбурзі, щоб надійно використовувати відеопотоки високої роздільної здатності під час перевірки деталей двигуна. Коли почалися обмеження на подорожі через пандемію COVID-19, цей варіант використання виявився критично важливим для бізнесу, оскільки висока швидкість і надійність цієї технології приватної мережі дозволили Lufthansa Technik транслювати відео перевірки своїм клієнтам, які не могли відвідати сайт.

- У Великій Британії Ferrovial SE , іспанська багатонаціональна компанія-розробник інфраструктури, розгорнула першу у Великій Британії приватну

автономну мережу 5G у проекті Silvertown Tunnel. Для цього проекту Ferrovial співпрацює з бельгійським постачальником кабельних широкосмугових послуг Telenet NV і фінським міжнаціональним постачальником телекомунікаційних технологій Nokia.

3. Автоматизація логістики з використанням AGV та AMR.

AGV і AMR покладаються на приватну мережу 5G для безпечного, надійного підключення та вказівок. За своєю природою AGV і AMR є ідеальними варіантами використання для приватного 5G, оскільки їх діяльність обмежена в межах об'єкта або кампусу та потребує безпечного та надійного з'єднання. Технологія приватної мережі дозволяє AGV і AMR здійснювати навігацію та працювати автономно, забезпечуючи безперебійну передачу даних у режимі реального часу, що має вирішальне значення для уникнення зіткнень, планування шляху та координації між кількома роботами. Ці транспортні засоби та роботи в основному використовуються в логістиці та складському господарстві, виробництві та портах.

Приклади використання AGV і AMR із приватною мережею 5G:

- У Бразилії Nestlé , швейцарська багатонаціональна компанія з виробництва продуктів харчування та напоїв, у партнерстві з бразильською телекомунікаційною компанією Embratel встановила приватну мережу 5G на підприємствах Nestlé для багатьох випадків використання, зокрема розгортання AGV для підвищення продуктивності.

- У США багатонаціональна компанія Deloitte, що надає професійні послуги, співпрацює з американською телекомунікаційною компанією Version , щоб побудувати The Smart Factory @ Wichita, захоплюючий центр досвіду, призначений для демонстрації та просування концепції розумних фабрик за допомогою технологій Industry 4.0. Verizon розгорнула на місці приватну мережу 5G , яка, серед інших випадків використання, дозволила оркеструвати та керувати AGV та AMR для переміщення матеріалів по заводу.

4. Камеральне спостереження за об'єктом.

Приватна мережа 5G з'єднує мережі камер для забезпечення оперативної інформації та безпеки. Моніторинг операцій для безпеки, безпеки та

поінформованості за допомогою бездротових камер високої роздільної здатності вимагає низької затримки та надійного з'єднання, яке зазвичай забезпечує 5G. Приватна мережа допомагає захистити відеопотік і забезпечити, щоб трафік загальнодоступної мережі не заважав якості потоку. Ці камери можна об'єднати зі штучним інтелектом для виконання автоматизованих повторюваних завдань візуального контролю з високою точністю, що забезпечує послідовність і виявлення дефектів із скороченням праці. Камери відеоспостереження також можна використовувати для виявлення людей і навіть обличчя для контролю доступу та попереджень [12].

Приклади відеоспостереження за об'єктами за допомогою камер із приватною мережею 5G:

- В Індонезії PT Freeport Indonesia , індонезійська багатонаціональна компанія, що надає послуги з видобутку корисних копалин, розгорнула підземне приватне рішення 5G для моніторингу операцій і умов для підвищення ефективності та безпеки працівників. Цей проект був здійснений у партнерстві з індонезійською телекомунікаційною компанією Telkomsel .

- В Іспанії порт Барселони у партнерстві з іспанською телекомунікаційною групою MasOrange розгорнув приватну мережу 5G для покращення своїх операцій, включаючи об'єднання понад 400 телевізійних камер замкнутого зв'язку для підтримки безпеки порту та роботи.

5. Огляд об'єктів або активів за допомогою окулярів AR.

Приватна мережа 5G забезпечує роботу додатків AR. Окуляри AR накладають цифрову інформацію на реальний світ, покращуючи її віртуальними елементами (наприклад, графікою, звуком і даними). Private 5G підтримує це, надаючи додатки та дані з високою пропускною здатністю, забезпечуючи складну взаємодію та миттєвий зворотний зв'язок, необхідний для захоплюючого досвіду інспекції об'єктів та активів із даними в реальному часі для зворотного зв'язку та вказівок.

Приклади перевірки об'єктів або активів за допомогою доповненої або віртуальної реальності для захоплюючої взаємодії з приватним 5G:

1. У Франції виробник сталі ArcelorMittal — у партнерстві з Orange і Ericsson — розгорнув приватну мережу 5G на своєму металургійному заводі в Дюнкерку (Дюнкерк), щоб увімкнути можливості AR для перевірки та безпеки.

2. У Сінгапурі компанія Zuellig Pharma , постачальник рішень для охорони здоров'я, запровадила систему підтвердження концепції підбору запасів і управління запасами на основі AR, щоб допомогти в складських операціях. Zuellig Pharma співпрацювала з ірландською компанією професійних послуг Accenture і сінгапурським постачальником комунікаційних послуг Singtel, щоб створити цей «склад 5G» як доказ концепції.

РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД КЛЮЧОВИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕРЕЖІ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ

2.1. Дослідження ключових технології для реалізації мережі

Для реалізації ключових вимог 5G еволюція та революція є двома основними технологічними шляхами. Шлях еволюції полягає в удосконаленні LTE-Advanced шляхом постійного збільшення системної ємності, ефективності спектру, досвіду користувача та ефективності роботи стільникових систем 4G. У 3GPP це називається LTE-A Pro.

Революційний шлях означає дослідження інноваційних ідей і новітніх технологій для значного підвищення продуктивності системи. Це називається новим радіо 5G у 3GPP. FDD і TDD тісно інтегровані в нове радіо LTE-A Pro і 5G, а TDD відіграватиме більш важливу роль, якої раніше не було.

Таблиця 2.1

Покращення можливостей 5G порівняно з 4G

Ключовий індекс ефективності	Значення для 5G ITU	Покращення порівняно з 4G
Щільність руху	10 Tbps/km2	1000 разів
Щільність з'єднання	1 milion/km2	1000 разів
Затримка	1 ms(RTT для радіоінтерфейсу)	1/10 разів
Пікова швидкість передачі даних	10/20 Gbps	100 разів
Швидкість передачі даних користувача	0,1-1Gbps or 0,1Gbps+опис	10 разів
Мобільність	500 km/h	<5 разів
Спектральна ефективність	[2/3/5]x	<5 разів
Енергоефективність	100x(мережі)	100 разів

Було запропоновано та прийнято багато еволюційних і революційних технологій, включно з головним чином масивним множинним входом і множинним виходом (MIMO), неортогональним множинним доступом (NOMA), надщільною мережею (UDN), вдосконаленим кодуванням і модуляцією, гнучким доступом до спектру, гнучким розробка повітряного інтерфейсу, зв'язок транспортного засобу з усім і нова мережева архітектура.

Технологія MIMO. Технологія MIMO додатково вдосконалена в 5G, а масивну технологію MIMO було схвалено як найефективнішу технологію для підвищення ефективності використання спектру. З більш ніж сотнею антен і десятками антенних портів, обладнаних базовою станцією, масивний MIMO можна використовувати для централізованого або розподіленого типу. Для кожного типу технологія потребує вдосконалення та оптимізації, включаючи розробку опорних сигналів, оцінку каналу, зворотний зв'язок інформації про канал, механізм планування для кількох користувачів та алгоритми отримання [12].

У сучасному середовищі, де кількість інтелектуальних пристроїв зростає з кожним днем, застосування технології MIMO є досить критичним. Ми можемо використовувати різні режими роботи відповідно до різних умов і різних бездротових середовищ. Є сім режимів роботи MIMO:

1. Режим роботи з однією антеною: він також відомий як система SISO (один вхід і один вихід), яка використовує одну антену для передачі сигналів і одну антену для прийому сигналів.

2. Рознесеність передачі з відкритим контуром: за допомогою математичного методу комплексних сполучень ортогональні просторові канали формуються на кількох антенах, і той самий потік даних надсилається для підвищення надійності передачі.

3. Просторове мультиплексування з відкритим циклом: штучно створіть "ефект багатопроменевості" на різних антенах, і одна антена передає нормально. Інші антени вводять зсув фази. Взаємозв'язок передачі кількох антен утворює складну матрицю, і різні потоки даних передаються паралельно. Ця комплексна матриця випадковим чином вибирається на передавальному кінці, незалежно від

результату зворотного зв'язку на приймальному кінці, який є просторовим мультиплексуванням без циклу.

4. Просторове мультиплексування із замкнутим контуром: коли передавач передає кілька потоків даних паралельно, він вибирає складну матрицю, яка створює «ефекти багатопроменевості» відповідно до результатів оцінки каналу зворотного зв'язку, що є просторовим мультиплексуванням із замкнутим циклом.

5. MU-MIMO: дозволяє передавачу передавати дані декільком користувачам одночасно.

6. Попереднє кодування RANK=1 із замкнутим контуром: тобто технологія космічного рознесення. Як окремий випадок просторового мультиплексування із замкнутим циклом передається лише один потік даних, тобто ранг просторового каналу дорівнює Rank=1. Цей робочий режим відіграє роль у підвищенні надійності передачі та фактично є способом передачі рознесеного сигналу.

7. Формування променя: формування променя також називають розумною антеною. Завдяки фазовому зваженню кореляції вихідних сигналів кількох антен, сигнали утворюють синфазну суперпозицію в певному напрямку та формують компенсацію фази в інших напрямках, таким чином досягаючи посилення сигналу.

Основними характеристиками антен MIMO є поляризація та просторове рознесення. Для поляризаційного рознесення електричні поля двох переданих сигналів орієнтовані під кутом 90^0 один від одного (наприклад, $0/90^0$ (горизонт/верт), $\pm$ 45^0 (нахил)). На малюнку 1 показано передачу похилих поляризованих хвиль у напрямку осі Z. Кожна з двох хвиль сама по собі є потоком даних або шаром. Весь поляризований сигнал, що передається вниз по осі Z елементами антени $\pm$ 45^0, ми називаємо променем [13].

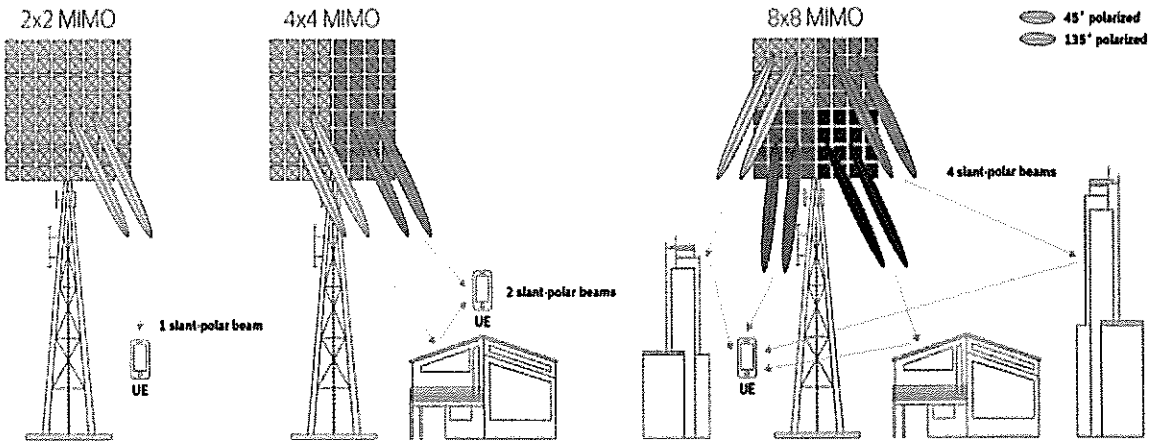


Рис. 2.1. MIMO для косо поляризованих променів із синіми/червоними лініями, що ділять навпіл, що позначає 45⁰/135⁰ поляризацію кожного потоку

На рис. 2.1 показано кілька променів, що передаються до кількох екземплярів UE (обладнання користувача) у мережі. Уважно вивчіть антену вежі стільникового зв'язку (базова приймально-передавальна станція або BTS) і UE. Читач помітить, що 2 промені – це лише 1 промінь, як показано на малюнку. Поява двох променів і схема кольорового кодування однієї синьої лінії навпіл і однієї червоної лінії навпіл ілюструють, як два похилі поляризовані потоки даних складають один промінь. показано на рис.2.1. Ця базова структура променя з двома ортогональними формами сигналу проілюстрована на рис.2.2.

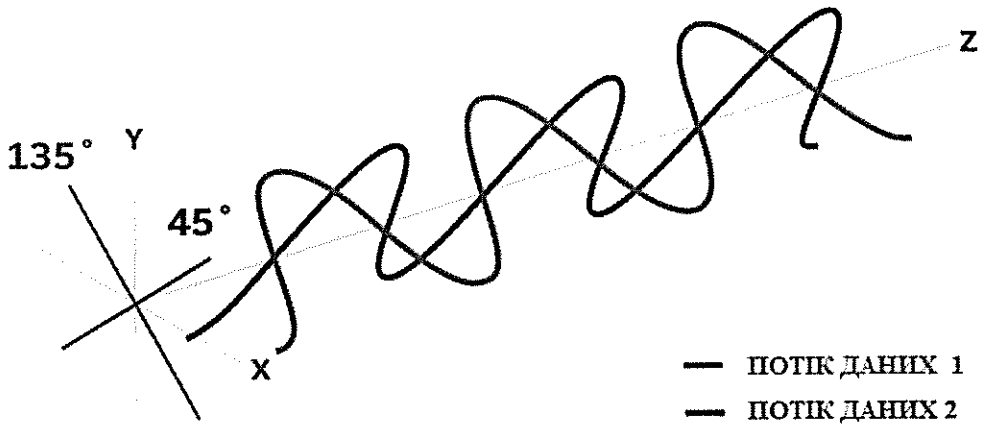


Рис. 2.2. Похилі (45⁰/135⁰) поляризовані хвилі/потоки даних, що передаються одним променем уздовж осі Z

Таким чином, крайня ліва BTS на рис.2.1 демонструє поляризаційне рознесення, еквівалентне 2×2 MIMO, яка включає 2 передавальні антени та 2 приймальні антени (2T2R), вирівняні на одній осі з похилою полярністю.

Просторове рознесення в системах MIMO. Просторове рознесення стосується антен, фізично розділених у просторі. Кілька, часто окружних шляхів, якими проходять хвильові фронти, що розповсюджуються («багатошляхове» розповсюдження), використовуються для підвищення продуктивності радіочастотної системи з архітектурою MIMO.1 Завдяки просторовому рознесенню кілька потоків даних можуть бути упаковані в той самий сегмент частотного спектру. в той же час і просто передаються з дещо іншого місця, що значно збільшує пропускну здатність радіоканалу. Як зазначалося раніше, багатошляхові відображення служать для підвищення продуктивності мережі, а не для її компрометації. Приклад явища багатопроменевого поширення показаний на центральній діаграмі на рис.2.1, де два похилих поляризованих променя передаються від BTS до UE. Один падає безпосередньо на UE через зону прямої видимості (LOS), а інший відбивається від даху будинку. У цьому конкретному випадку UE повинно мати 4 антени для прийому обох потоків даних на обох променях. Це називається 4×4 MIMO або 4T4R. Багато сучасних стільникових телефонів (смартфонів) створено з можливістю 4×4 MIMO. Samsung Galaxy® Note 7 і iPhone® XS і XS Max були одними з перших прикладів [12].

Масивний MIMO (mMIMO) у LTE Advanced & Beyond. Діаграма, розташована праворуч на рис.2.1, демонструє 4 промені, що передаються: один досягає UE LOS, один відбивається від будинку та два відбивають кожну з двох будівель. Передача та прийом цих 4 променів, кожен з яких містить 2 потоки даних, утворюють архітектуру 8×8 MIMO, або 8T8R. Зверніть увагу, що хоча похила поляризація не є нерозривно пов'язаною з кожним типом антени, вона настільки поширена серед UE, що її можна вважати повсюдною.

LTE-Advanced (також LTE-+ або LTE-A), вперше представлений компанією NTT DoCoMo з Японії та стандартизований проектом партнерства 3-го покоління (3GPP) як випуск 10 у березні 2011 року, містив до 8 потоків даних або 8×8 MIMO.4

Для LTE-A версії 12 і 13 3GPP представили систему активної антени (AAS) і масивну роботу MIMO (mMIMO).5 AAS — це система антени, в якій активна електроніка (підсилювачі потужності, підсилювачі з низьким рівнем шуму, підсилювачі зі змінною фазою перемикачі тощо) вбудовані для підтримки функцій передачі та прийому. Massive MIMO (mMIMO) використовує формування променя в реальному часі для збільшення пропускної здатності та зменшення перешкод. Хоча на практиці визначення mMIMO різняться, для цілей цієї примітки до програми ми припустимо, що потрібна мінімальна конфігурація з 8 передавальних/8 приймальних антен (8 × 8 MIMO або 8T8R) і що певна міра формування променя в реальному часі використовується для справжньої роботи mMIMO [13].

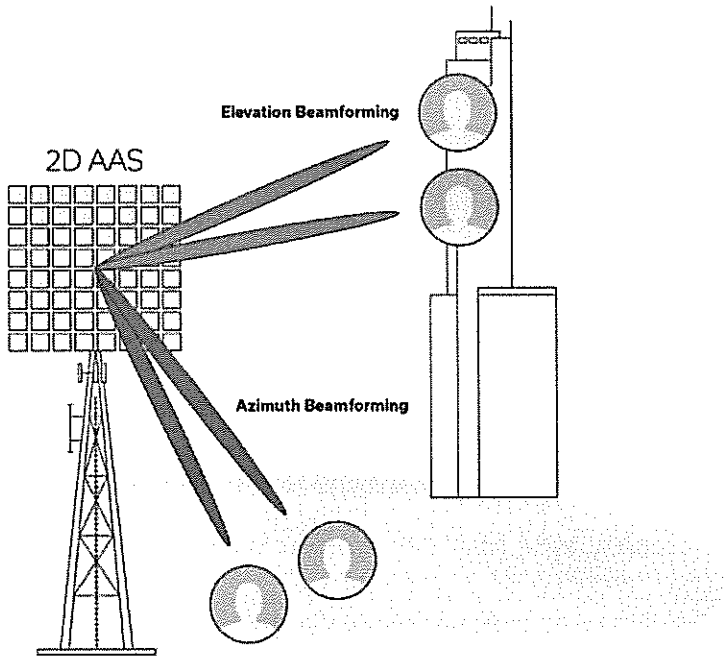


Рис. 2.3. Формування променя шляхом зміни висоти (по вертикалі по всій будівлі) та азимута (поперек землі)

Ілюстрація того, як AAS виконує формування променя, показана на рис.2.3. Двовимірна (2D) активна антенна система (AAS) передає 2 промені на землю, які демонструють чітку зміну азимута, і два, спрямовані на будівлю, які демонструють

зміну висоти. . Зауважте, що антенні решітки на рис. 2.2 і рис.2.3 мають розміри 8×8 і 4×8, відповідно, і здатні підтримувати не лише одне UE або стільниковий телефон. Насправді сучасні мобільні телефони підтримують 4×4 MIMO для частот нижче 6 ГГц і mmWave 5G. Очевидно, що більшість елементів антени залишаються здатними підтримувати досить багато UE у цій конкретній комірці в мережі. Стільникові мережі, безумовно, є чудовим прикладом багатокористувацького MIMO або MU-MIMO.

Неортогональний множинний доступ (NOMA). У попередніх поколіннях систем бездротового зв'язку основним вибором були ортогональні схеми множинного доступу в часовій, частотній або кодовій області через обмежені можливості обробки в апаратному забезпеченні трансивера та скромні вимоги до трафіку як щодо затримки, так і підключення [13].

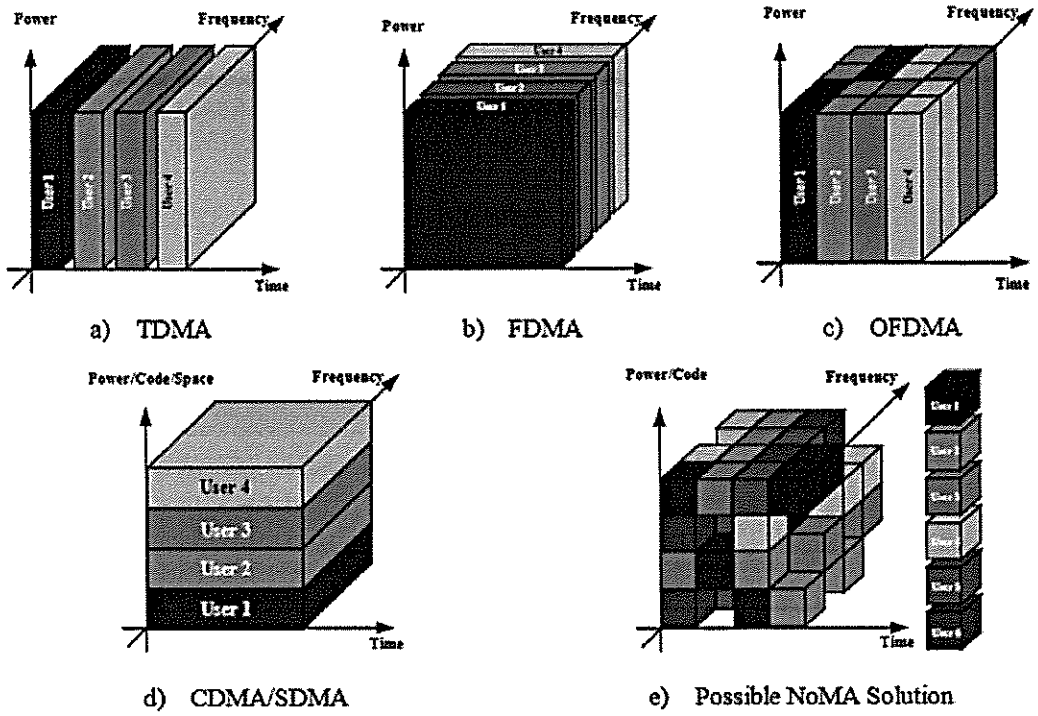


Рис. 2.4. Приклад різних схем множинного доступу.

Однак для системи 5G підключення 1 мільйона пристроїв на квадратний кілометр потребує значно розвиненого апаратного забезпечення.

Неортогональний множинний доступ визначено як перспективну технологію для досягнення цілей щодо пропускної здатності системи, підключення користувачів і затримки обслуговування.

У порівнянні з OMA, неортогональний множинний доступ (NoMA) відкриває горизонт для нового кута мислення. Зокрема, завдяки послабленню обмеження ортогонального розподілу радіоресурсів проблема планування користувача, обмежена обмеженим часом і ресурсами пропускної здатності, більше не є двійковим вибором, а оптимізацією спільної потужності, кодового підпису та конструкції приймача. Як уже давно передбачала теорія мережевої інформації [14], загальна кількість обслуговуваних користувачів, а також загальна пропускна здатність системи можуть бути значно покращені в мережі NoMA порівняно з мережею OMA, особливо коли розширені мультимережі -застосовуються алгоритми виявлення користувачів.

Крім того, через неортогональну природу вимога до точного зворотного зв'язку каналу та планування для багатокористувацького мультиплексування таким чином зменшується або навіть усувається в деяких сценаріях.

Загальний приклад неортогонального множинного доступу описано на малюнку 1-е), в якому різні користувачі мультиплексуються в трьох доменах часу, частоти та потужності/коду, що означає, що користувачі не є ортогональними в жодному з доменів окремо. Однак, застосовуючи відповідний дизайн коду та шаблони заповнення часу/частоти, користувачів можна ефективно декодувати/розділяти, а загалом можна досягти кращої продуктивності порівняно з OMA.

Надщільна мережа (UDN).

UDN має на меті забезпечити дуже високу швидкість передачі даних кожному користувачеві для сценаріїв усередині приміщень і точок доступу, включаючи офіси, густонаселені житлові райони, стадіони та місця для зборів просто неба. Типова підтримка UDN для дуже високої щільності користувачів, дуже високої щільності трафіку та дуже високої щільності точок доступу (AP)[15].

Традиційна стільникова система зазвичай забезпечує безперебійне покриття великої території. Різні відмінності між UDN і традиційною стільниковою мережею підсумовано в табл.2.2. Основні проблеми UDN включають управління перешкодами, віртуалізацію стільникового зв'язку, інтегрований доступ, бездротовий зворотний зв'язок і дизайн, орієнтований на користувача.

Таблиця 2.2

Порівняння між ультращільною мережею (UDN) і традиційною стільниковою мережею

Параметри	UDN	Традиційна стільникова мережа
Сценарії розгортання	В приміщенні, гаряча точка	Широке охоплення
Щільність точки доступу	Порівняно з щільністю користувачів	Мах нижче, ніж щільність користувачів
Типи точок доступу	Small cell, pico, femto, UE relay, relay	Базова станція Marco/micro
Тропічне покриття	Близько 10 м	Кілька сотень метрів і більше
Характеристики покриття	Неоднорідний, нерегулярний	Одношарова, звичайна клітина
Щільність користувачів	Високий	Низький/середній
Зворотний зв'язок	Ідеальний/неідеальний, дротовий/бездротовий	Низький/середній
Мобільність користувача	Мала мобільність	Висока мобільність
Вимога до швидкості передачі даних	Високий	Низький/середній
Смуги спектру	Вище, ширше	Нижчий, обмежений

Розширене кодування та модуляція.

Окрім традиційного двійкового турбо-коду та квадратурної амплітудної модуляції (QAM), 5G має підтримувати розширені методи кодування та модуляції для більш широких послуг. Для послуг з високою швидкістю передачі даних можна використовувати перевірку парності низької щільності (LDPC), нове відображення

сузір'їв і систему швидше за Найквіста (FTN) для подальшого покращення зв'язку. спектральна ефективність. Для низьких швидкостей передачі даних і служб невеликих пакетів можна використовувати полярні коди і коди згортки з низькою швидкістю кодування, щоб наблизитися до обмеження пропускної здатності Шеннона у випадках короткої довжини коду та низького SNR. Для послуг із низькою затримкою перевагу надають схемам кодування з швидкими алгоритмами кодування та декодування. Для високонадійних послуг слід уникати ефекту «помилки» алгоритмів декодування. Крім того, у щільній мережі може існувати кілька бездротових каналів зв'язку, і пропускну здатність системи транспортного зв'язку можна збільшити за допомогою кодування мережі [15].

Гнучкий доступ до спектру.

На відміну від попередніх поколінь, 5G включає як низькочастотні (НЧ) діапазони нижче 6 ГГц, так і високочастотні (ВЧ) діапазони 6–100 ГГц, де НЧ діапазони є основними діапазонами 5G, які використовуються для безперебійного покриття, і КВ. смуги — це додаткові смуги для досягнення високих швидкостей передачі даних у зонах гарячих точок. Щоб повністю використати переваги різних частот, 5G має підтримувати гібридні мережі з діапазонами НЧ і ВЧ, щоб одночасно відповідати вимогам безперервного покриття, надвисокої швидкості передачі даних і надвисокої пропускної здатності.

Враховуючи великі відмінності між діапазонами HF і традиційними діапазонами LF, дослідження доступу до спектру 5G зосереджені в основному на ключових технологіях, включаючи вимірювання та моделювання каналів, новий дизайн радіоінтерфейсу, мережеві технології та радіочастотні компоненти для мобільного зв'язку на HF.

Окрім технологій, які обговорюються для діапазонів ВЧ та інших традиційних методів ефективності використання спектру, інноваційні методи використання спектру також є ефективними способами розширення використовуваної частоти для систем 5G. Потенційні гнучкі схеми спільного використання спектру включають внутрішнє операторське міжоператорське

використання RAT, міжоператорське використання, спільне використання спектру в неліцензованій смузі та у вторинному доступі.

Гнучкий дизайн радіоінтерфейсу.

Для підтримки трьох типових сценаріїв, визначених ITU, 5G потребує гнучкої конструкції радіоінтерфейсу, що охоплює структуру кадру, дуплексний режим, форму хвилі тощо. Для досягнення уніфікованої структури радіоінтерфейсу ключові параметри структури кадру 5G, такі як пропускна здатність, відстань піднесучих, циклічний префікс (CP), часовий інтервал передачі (TTI) і конфігурацію висхідної-низхідної лінії зв'язку можна гнучко налаштувати для різноманітних сценаріїв і послуг. Крім того, опорні сигнали та канали керування можна гнучко налаштувати для підтримки додатків ключових технологій. За винятком традиційних FDD і TDD, 5G підтримуватиме гнучкий дуплекс. З одного боку, FDD або TDD можна вибрати відповідно до діапазону частот; наприклад, FDD зазвичай приймається в діапазоні LF, тоді як TDD може бути прийнятий як в діапазонах LF, так і в HF. З іншого боку, часові та частотні ресурси висхідної та низхідної лінії зв'язку можна гнучко розподіляти, щоб краще адаптуватися до нерівномірного та динамічного розподілу послуг. Повний дуплекс може бути додатковим рішенням, що підтримує одночасну передачу та прийом на одному частотному ресурсі [16].

На додаток до традиційних форм сигналу OFDM і однієї несучої, 5G, можливо, прийме нові форми сигналів на основі оптимізованої фільтрації, наприклад багатоканальних фільтрів, filtered-OFDM і універсальну фільтрацію кількох несучих. З дуже низьким позасмуговим витоком ці сигнали можуть підвищити ефективність використання спектру, ефективно використовувати фрагментований спектр і співіснувати з іншими сигналами.

Vehicle-to-everything (V2X).

Транспортний засіб включає зв'язок транспортний засіб – автомобіль (V2V), транспортний засіб – пішохід (V2P), транспортний засіб – інфраструктура (V2I) і транспортний засіб – мережа (V2N). V2X покращує безпеку дорожнього руху,

ефективність руху та доступність інформаційно-розважальних сервісів (Chen et al., 2017b).

Завдяки глобальному розгортанню та швидкому комерціалізації систем довгострокової еволюції (LTE) V2X на основі LTE під назвою LTE-V або LTE V2X стандартизовано в 3GPP. LTE-V забезпечує два взаємодоповнюючі режими зв'язку: один — LTE-V-Cell як централізована архітектура, а інший — LTE-V-Direct для децентралізованого зв'язку V2V. Щоб відповідати вимогам до продуктивності зв'язку V2X, LTE-V використовує покращення структури опорного сигналу демодуляції (DMRS), узгоджену синхронізацію між глобальною навігаційною супутниковою системою (GNSS) і синхронізацію на основі eNB, мультиплексування з частотним поділом (FDM) і мультиплексування з часовим поділом. (TDM) для мультиплексування ресурсів між транспортними засобами, напівпостійного планування (SPS), розподілу ресурсів на основі датчиків тощо.

2.2. Огляд архітектури базової мережі 5G

Архітектура базової мережі 5G містить різні функції та елементи мережі, кожен з яких виконує певну роль у сприянні спілкуванню між користувачами, пристроями та програмами. На відміну від своїх попередників, базова мережа 5G базується на архітектурі, що базується на послугах, що підкреслює модульність, гнучкість та ефективність.

Основні функції базової мережі 5G. Функція рівня користувача (UPF): UPF виконує функції пересилання даних і маршрутизації пакетів у мережі 5G. Він відповідає за ефективну передачу пакетів даних користувача між обладнанням користувача (UE) і зовнішніми мережами або службами. UPF забезпечує низьку затримку, високу пропускну здатність і надійну доставку даних, що робить його необхідним для підтримки програм, які потребують великої пропускної здатності, таких як потокове передавання, ігри та віртуальна реальність.

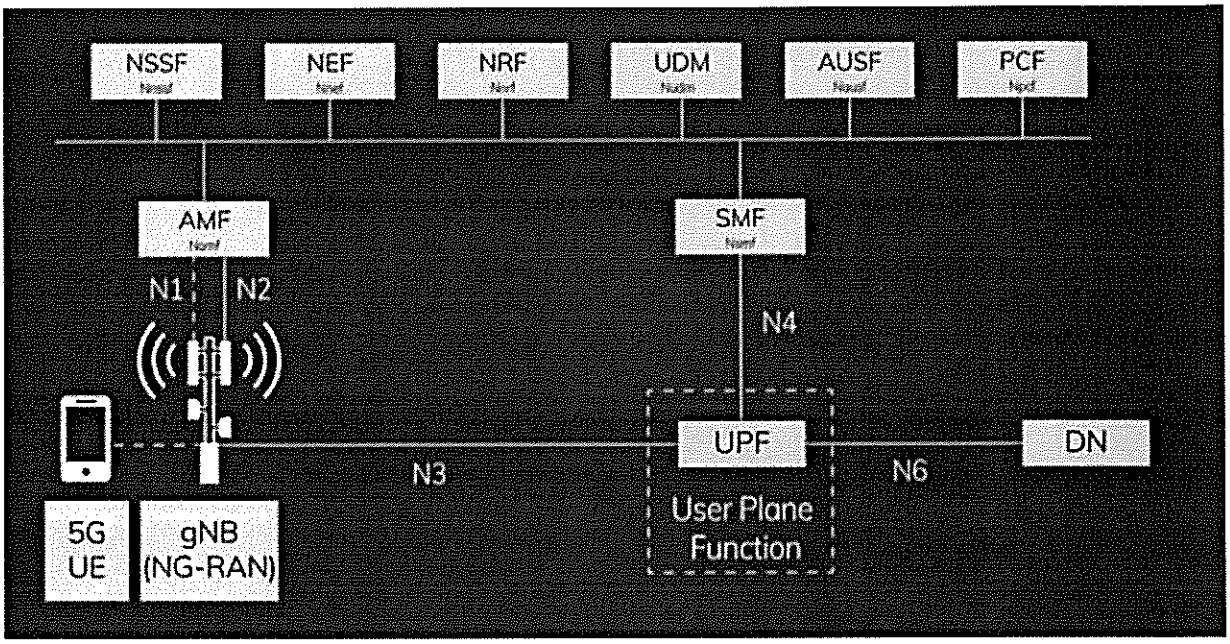


Рис. 2.5. Архітектура базової мережі 5G

- Функція контрольної площини (CPF): CPF керує функціями сигналізації та контролю в мережі 5G, включаючи керування мобільністю, встановлення сеансу та автентифікацію. Він спілкується з UE та іншими мережевими функціями для встановлення та підтримки з'єднань, керування подіями мобільності та застосування мережевих політик. CPF відіграє вирішальну роль в оптимізації мережевих ресурсів, забезпеченні якості обслуговування (QoS) і забезпеченні безперебійної передачі між різними осередками мережі.

- Функція керування сеансами (SMF): SMF відповідає за керування сеансами користувачів і потоками даних у мережі 5G. Він встановлює та підтримує контекстну інформацію для активних сеансів, включаючи ідентифікатори користувачів, вимоги QoS і стани сеансів. SMF координує роботу з іншими функціями мережі для розподілу ресурсів, застосування політик і оптимізації продуктивності сеансу на основі динамічних умов трафіку та вимог користувачів.

- Функція керування доступом і мобільністю (AMF): AMF керує функціями доступу та мобільності, включаючи процедури реєстрації, автентифікації та передачі. Він автентифікує користувачів, авторизує доступ до мережевих служб і керує подіями мобільності, наприклад перемиканням між різними технологіями доступу або сегментами мережі. AMF забезпечує безперебійне підключення для

користувачів, які переміщуються між різними зонами мережі або перемикаються між стільниковими та нестільниковими технологіями доступу.

- Функція контролю політики (PCF): PCF відповідає за дотримання мережевих політик і угод про рівень обслуговування (SLA) у мережі 5G. Він динамічно розподіляє ресурси, застосовує правила QoS і забезпечує виконання політик управління трафіком на основі профілів користувачів, вимог до послуг і умов мережі. PCF відіграє вирішальну роль в оптимізації використання ресурсів, визначенні пріоритетів критичного трафіку та забезпеченні справедливого розподілу мережевих ресурсів між різними користувачами та програмами.

- Функція сервера автентифікації (AUSF): AUSF автентифікує користувачів і пристрої, які отримують доступ до мережі 5G, перевіряючи їхні особи та облікові дані. Він безпечно зберігає інформацію автентифікації, таку як ідентифікаційні дані користувачів, паролі та криптографічні ключі, і перевіряє запити користувачів на доступ до мережі. AUSF забезпечує цілісність і безпеку процесу автентифікації, захищаючи від несанкціонованого доступу та крадіжки особистих даних.

- Функція єдиного керування даними (UDM): UDM керує ідентифікацією користувача та інформацією про підписку в мережі 5G. Він зберігає профілі користувачів, підписки на послуги та облікові дані для автентифікації, забезпечуючи плавний доступ до мережевих служб і програм. UDM полегшує персоналізовані послуги, автентифікацію користувачів і керування ідентифікацією в різних мережевих функціях і доменах.

Нарізка мережі. Нарізка мережі стає ключовою функцією архітектури базової мережі 5G, що дозволяє операторам розділяти мережу на окремі віртуальні сегменти, кожен з яких налаштований для конкретних випадків використання або вимог до послуг. Це полегшує одночасну підтримку різноманітних додатків із різними вимогами до продуктивності, затримки та пропускної здатності, одночасно забезпечуючи ізоляцію та безпеку між сегментами [16].

Хмарне розгортання. Основна мережева архітектура 5G використовує принципи використання хмарних технологій і використовує віртуалізацію, контейнеризацію та архітектуру мікросервісів для досягнення підвищеної

гнучкості, масштабованості та ефективності. Завдяки розгортанню мережевих функцій як легких, незалежно масштабованих контейнерів, оператори можуть динамічно розподіляти ресурси, оптимізувати продуктивність і швидко розгортати нові сервіси, щоб задовольнити потреби, що постійно змінюються.

Віртуалізація мережевих функцій (NFV). NFV є ще одним важливим елементом архітектури базової мережі 5G, що забезпечує віртуалізацію мережевих функцій, які традиційно реалізуються як пропрієтарні апаратні пристрої. Відокремлюючи програмне забезпечення від апаратного забезпечення, NFV знижує витрати, підвищує гнучкість і прискорює інновації, дозволяючи операторам ефективніше розгортати та масштабувати мережеві функції.

По суті, архітектура базової мережі 5G віщує зміну парадигми в дизайні бездротової мережі, використовуючи принципи, засновані на послугах, хмарні технології та віртуалізацію, щоб створити більш адаптовану, масштабовану та ефективну мережеву інфраструктуру, здатну підтримувати безліч програм і послуги.

Це лише деякі з ключових функцій архітектури базової мережі 5G. Крім того, архітектура може включати інші мережеві функції та елементи, такі як функція Network Exposure Function (NEF), функція Network Repository Function (NRF) і функція Network Slice Selection Function (NSSF), кожна з яких виконує певну роль у ввімкненні розширених функцій і можливостей. мереж 5G.

2.3. Стандартизація та випробування технології

Стандартизація 5G. Багато організацій були залучені до 5G, наприклад ITU, 3GPP і NGMN ITU: ITU розпочав підготовчу роботу до 5G на початку 2010-х років і випустив такі файли, як IMT.trend (ITU-R) та IMT.vision (ITU). Крім того, ITU офіційно назвав 5G IMT-2020. Після цього ITU підготував технічну колекцію 5G і технічну оцінку, очікуючи випустити збірку, що задовольняє всі вимоги як стандарт 5G, на 36-й зустрічі ITU-R WP5D у 2020 році.

3GPP: 3GPP схвалив деякі дослідження, пов'язані з 5G, навіть у випуску 13, наприклад моделювання каналів і вимоги до 5G. Потім 3GPP запустив роботу 5G NR з елемента дослідження у випуску 14, а потім робочі елементи у випуску 15 і далі. Згідно з планом випуску 15 від 3GPP, стандарт 5G розділений на неавтономну (NSA) і автономну (SA) частини. Щоб виконати план розгортання деяких операторів, 5G NSA заморозили наприкінці 2017 року, раніше запланованої дати. Це перехідне рішення, яке має подвійне підключення за допомогою LTE та 5G NR для розгортання 5G в існуючій мережі LTE [16].

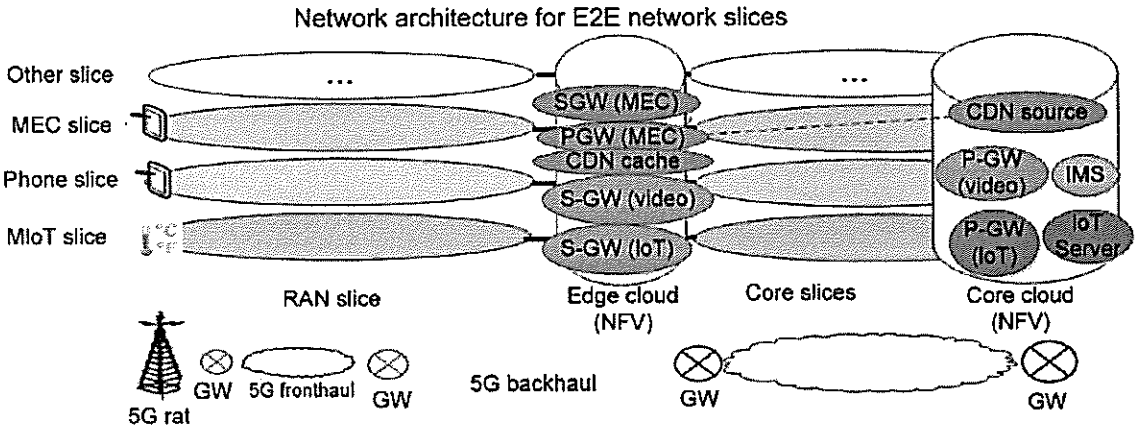


Рис. 2.6. Ілюстрація нарізки мережі

Оскільки не існує незалежної площини сигналізації, 5G NSA спрямована головним чином на покращення гарячих точок. У порівнянні з 4G, 5G NR приносить багато змін, таких як набагато ширша смуга пропускання до 400 МГц, масштабований інтервал піднесучих із $n \times 2^N$, гнучка структура кадру зі змінною нумерологією, LDPC і полярне кодування, масивний MIMO, міліметрові хвилі, і розділення блоку керування та розподіленого блоку.

Оскільки поточний 5G NR закладає в основному основу для eMBB, після випуску 15 потрібні додаткові вдосконалення. Серед них V2X представляє важливу функцію для URLLC. Як показано на рис. 2.7, LTE V2X розглядається як фаза 1 стільникового зв'язку 5G V2X (C-V2X). Фаза 2 — це поточна робота у випуску 15, включаючи робочий елемент LTE eV2X і елемент дослідження оцінки V2X. Фаза 3 ілібуде майбутньою роботою у випуску 16 і далі. Потенційна робота може

включати NR V2X і його вдосконалення. Для тих 25 варіантів використання, визначених у Робочій групі 1 системної архітектури (SA1), кожен з яких підтримує роботу Uu та бічного зв'язку для NR V2X, очікується, що структура нещодавно запропонованого елемента дослідження NR V2X включатиме вдосконалення NR Uu та бічний зв'язок NR. LTE V2X і NR V2X будуть співіснувати для націлювання на відповідні програми; наприклад, LTE V2X використовуватиметься для основних служб безпеки, тоді як NR V2X використовуватиметься для додаткових випадків використання.

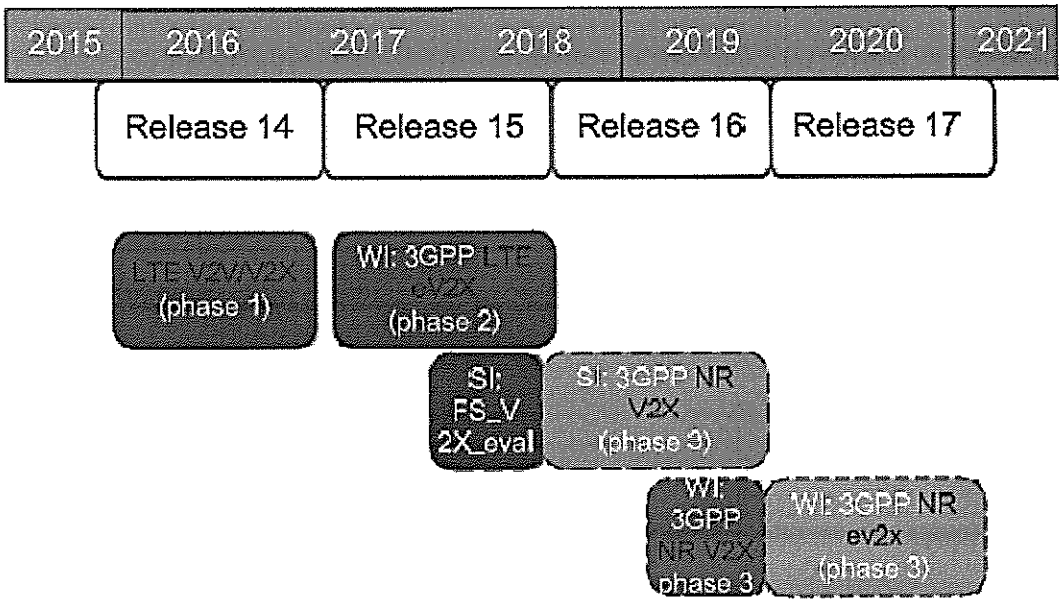


Рис. 2.7. Стандартний часовий план 3GPP C-V2X

5G SA буде заморожено в червні 2018 року, і він сформує уніфікований стандарт 5G NR, що підтримує незалежні та незалежні мережі. Він задовольнить як сценарії eMBB, так і URLLC, заклавши основу для створення глобально стандартизованої екосистеми 5G. Щоб отримати остаточну версію, яка задовольняє всі вимоги, визначені ITU, необхідно виконати подальше вдосконалення для 5G NR у версії 16 3GPP. Обговорювані теми включають удосконалення радіоінтерфейсу, удосконалення MIMO, неліцензійне використання, ретрансляцію, неортогональний множинний доступ, C -V2X, покращення позиціонування, енергозбереження терміналу [16].

Інтернет речей (IIoT), збір і використання великих даних.

Окрім ITU та 3GPP, такі організації, як NGMN та GSMA, почали обговорення 5G приблизно у 2015 році та випустили низку офіційних документів.

2.4. Комунікації на міліметровому діапазоні

Технології бездротового зв'язку вже змінили спосіб спілкування та взаємодії для мільярдів людей. За даними [17], до 2023 року понад 70% населення планети матиме мобільний зв'язок. Ще більш значне зростання очікується завдяки підключенню машинного типу та автономним транспортним засобам, тобто інтелектуальним транспортним системам, дронам та роботам, які становитимуть половину глобально підключених пристроїв до 2023 року. Величезне збільшення підключень супроводжуватиметься розробкою нових додатків, що потребують даних, наприклад, віртуальної та доповненої реальності (VAR), які створять величезний обсяг трафіку. Очікується, що між 2020 і 2030 роками цей показник зростатиме приблизно на 55% щорічно, досягнувши неймовірної кількості 5000 ексабайт (EX) трафіку даних [18]. В основному три підходи ведуть дослідження, щоб задовольнити цей постійно зростаючий попит на з'єднання та трафік: i) збільшення кількості антен у передавача (Tx) і приймача (Rx), ii) ущільнення базових радіостанцій і iii) збільшення ресурсів спектру за рахунок використання нових діапазонів частот. Останнє рішення визначає зв'язок міліметрового (міліметрового) діапазону як ключову технологію для наступних поколінь мобільного зв'язку. Зокрема, зв'язок мм-хвиль використовує величезну кількість діапазонів частот від 30 ГГц до 300 ГГц, щоб задовольнити зростаючий попит на з'єднання та трафік. Однак, як пояснюється більш детально нижче, поширення сигналу в діапазонах частот мм-хвиль має деякі особливості, які знижують надійність зв'язку, особливо для сценаріїв, які характеризуються мобільністю та численними фізичними перешкодами.

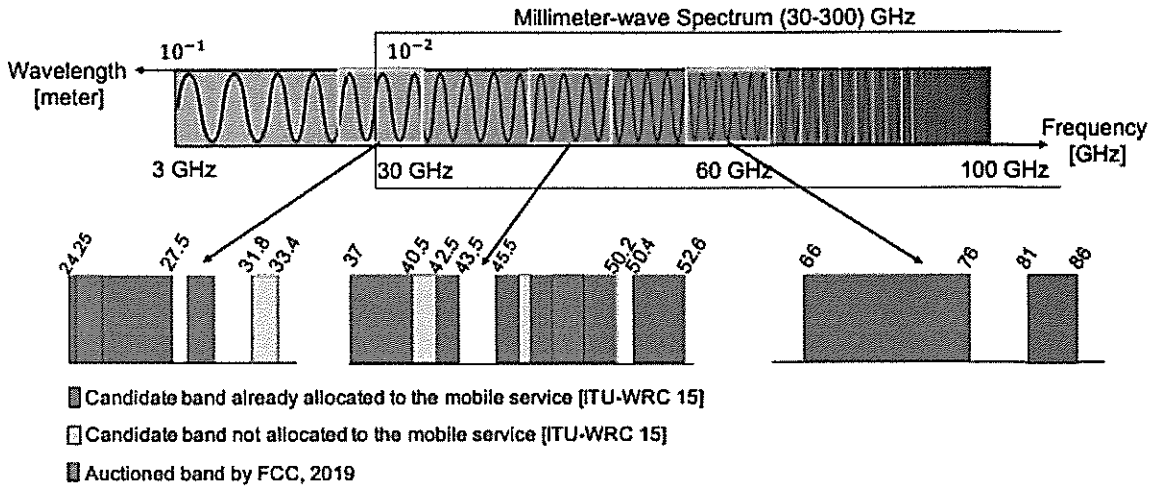


Рис.2.8. Діапазони мм-хвиль-кандидатів для послуг мобільного зв'язку Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU) і спектр мм-хвиль, виставлений на аукціон Федеральною комісією зв'язку (FCC)

2.4.1. Аналіз характеристик міліметрового діапазону

Міліметровий діапазон хвиль дає можливість використовувати частотні смуги шириною до кількох гігагерц, що значно перевищує смуги, доступні в традиційних радіочастотних діапазонах до 6 ГГц. Це дозволяє досягати швидкостей передачі даних до одиниць і навіть десятків Гбіт/сек. Серед найпопулярніших для розробки нових систем фіксованого радіозв'язку є діапазони міліметрових (або близьких до них) частот: 24,25 – 26,5 ГГц, 27,5 – 29,5 ГГц, 40,5 – 43,5 ГГц, 57 – 66 ГГц, 71 – 76/81 – 86 ГГц та 92 – 95 ГГц, які відображені на частотній шкалі на рис.2.9.

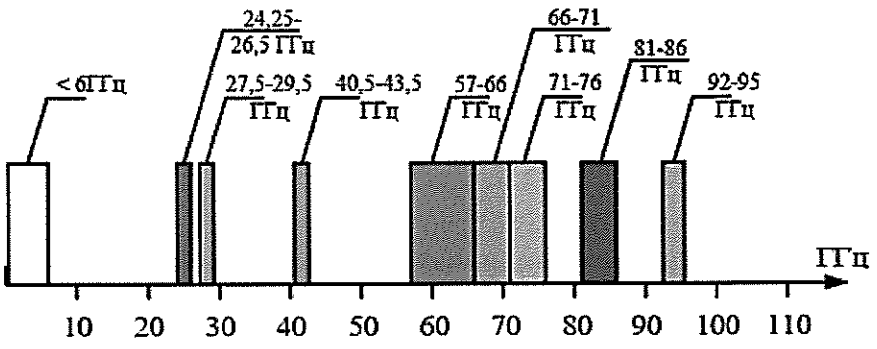


Рис.2.9. Найбільш поширені діапазони міліметрових хвиль.

Однак, крім своїх переваг, міліметровий діапазон накладає певні вимоги на системи зв'язку та їх елементи. Однією з основних проблем при розробці систем радіозв'язку в цьому діапазоні є необхідність забезпечення високих коефіцієнтів посилення антен для компенсації сильного загасання сигналу в каналі порівняно з діапазонами нижче 6 ГГц [19]. Для визначення відстані радіоз'єднання зазвичай використовують формулу Фріїса. Очевидно, що при передачі сигналу міліметрового діапазону у відкритому просторі рівень прийнятої потужності значно нижчий, ніж у випадку з нижчими частотами (за однакових відстаней і посилення антен) через більшу електричну довжину зв'язку. Наприклад, на частоті 60 ГГц рівень прийнятої потужності нижчий на 28 дБ та 21,5 дБ порівняно з широко використовуваними діапазонами 2,4 і 5 ГГц. Тому системи міліметрового діапазону повинні застосовувати антени з високим коефіцієнтом посилення і вузьким головним променем, навіть при невеликих відстанях. Додатковим чинником ослаблення радіохвиль є вплив кисню та водяної пари [20], що зображено на рис.2.10.

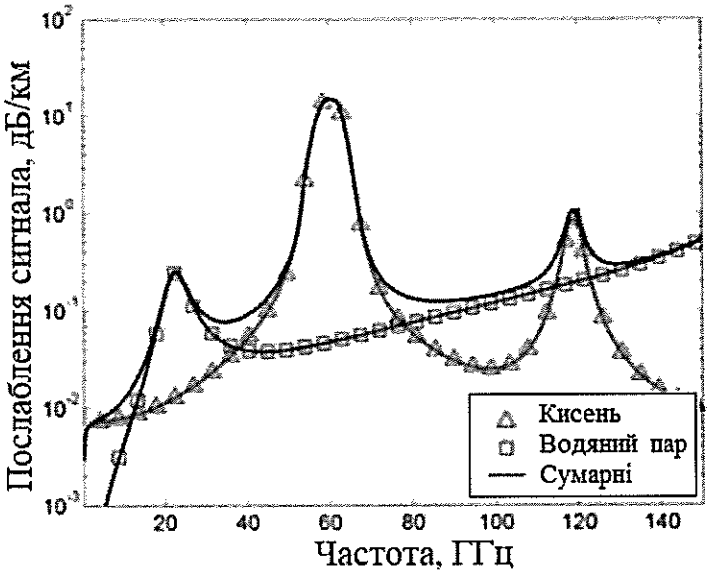


Рис. 2.10. Величина загасання радіосигналу в каналі зв'язку, що викликане впливом кисню та водяної пари

Значний вплив на рівень загасання також мають опади, про що йдеться в джерелах [20] та [21], а також у рекомендаціях Міжнародного Союзу Електрозв'язку (ITU). Рівень ослаблення радіосигналу залежно від інтенсивності опадів показано на рис. 2.11.

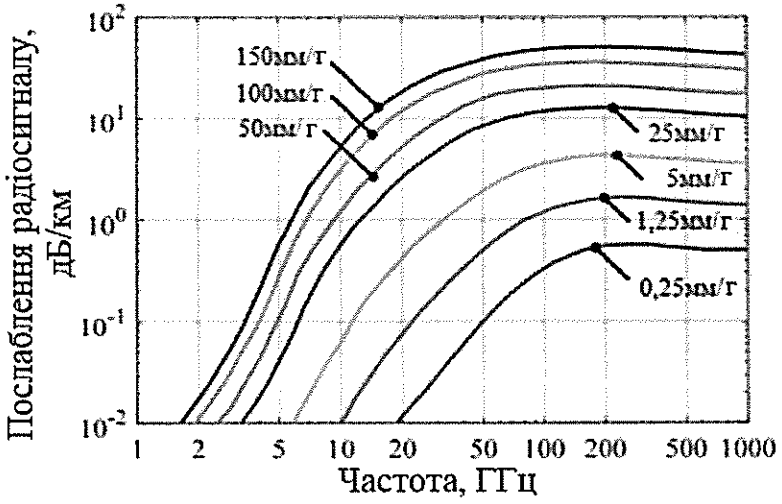


Рис. 2.11. Ослаблення радіосигналу за різними рівнями інтенсивності опадів.

При інтенсивності опадів, характерних для дощу (25 мм/год), загальний рівень загасання радіосигналу зростає з 0,05 дБ/км до 6 дБ/км при збільшенні робочої частоти з 6 ГГц до 30 ГГц, що суттєво впливає на характеристики радіоз'єднання. Інтенсивність дощу є статистичним параметром, який визначається певною ймовірнісною щільністю, характерною для кожного регіону. Для оцінювання роботи системи зв'язку зазвичай використовується критерій доступності каналу, який визначає середню тривалість забезпечення заявленої пропускної здатності. У сучасних комунікаційних системах найпоширенішими є показники доступності на рівні 99,9%, 99,99% та 99,999%, що еквівалентно часу відсутності зв'язку на каналі приблизно 52 хвилини, 5 хвилин і 30 секунд на рік відповідно. У цьому контексті основні нормативні акти США та європейських країн передбачають використання в міліметровому діапазоні частот тільки вузьконаправлених антен для систем типу «точка-точка», або комбінації

вузьконаправлених антен абонентських станцій із секторними антенами з одним променем на базовій станції для систем «точка-багатоточковий зв'язок».

Слід зауважити, що у більшості випадків ці антени оснащені хвилеводним інтерфейсом, що вимагає застосування переходів між металевими хвилеводами та планарними лініями передачі для підключення до елементів радіочастотного тракту системи зв'язку. Ще одним ключовим аспектом проектування систем радіозв'язку в міліметровому діапазоні є суттєве зростання втрат у лініях передачі зі збільшенням частоти. Окрім цього, значного впливу набувають властивості матеріалів і технологічні нюанси їх виготовлення. У подальшому буде розглянуто поширення міліметрових хвиль у хвилеводах і планарних лініях передачі.

2.4.2. Поширення хвиль міліметрового діапазону

Порожні металеві хвилеводи активно застосовуються для мінімізації втрат при передачі сигналів або для роботи з високопотужними сигналами на високих частотах. Завдяки своїм розмірним і ваговим обмеженням жорсткі хвилеводи зазвичай використовуються у частотному діапазоні від 1 ГГц до кількох ТГц. Прямокутні хвилеводи найкраще підходять для передачі сигналів з лінійною поляризацією, у той час як хвилеводи з квадратним або круглим перетином призначені для роботи із сигналами кругової поляризації або сигналами з двома ортогональними лінійними поляризаціями.

Основна мода поширення сигналу в прямокутних хвилеводах — TE10, для якої електричне поле не спрямоване вздовж напрямку руху сигналу. Вибір цієї моди для розробки хвилеводних пристроїв пояснюється тим, що вона забезпечує найширший робочий частотний діапазон в одномодовому режимі (за умов передачі лише однієї моди), має найменші габарити поперечного перерізу в заданому частотному діапазоні, а також характеризується мінімальними втратами при поширенні сигналу.

Таким чином, класифікація хвилеводів здійснюється відповідно до їх розмірів, які визначають частотну смугу пропускання. Одну з основних систем

класифікації прямокутних хвилеводів розробила Міжнародна Електротехнічна Комісія (IEC) у стандартизованій формі. Наприклад, згідно з цією класифікацією, для роботи у найбільш поширених міліметрових діапазонах застосовуються хвилеводи з характеристиками, наведеними у табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Хвилеводи призначені для використання в найбільш поширених міліметрових діапазонах

Значення	f_{c10}ГГц	Перетин $a \times b$,мм	Робочий діапазон частот, ГГц
WR34	17,36	8,64×4,32	21,7-33,0
WR28	21,08	7,12×3,56	26,4-40,1
WR22	26,35	5,69×2,85	33,0-50,1
WR15	39,88	3,76 ×1,88	49,9-75,8
WR12	48,38	3,1×1,55	60,5-92,0
WR10	59,02	2,54×1,27	73,8-112

Хоча хвилеводні лінії передачі мають чудові електродинамічні властивості, що дозволяють ефективно передавати сигнали в міліметровому діапазоні з мінімальними втратами, їхні характеристики можуть значно змінюватися під впливом технологічних аспектів виготовлення, властивостей матеріалів і обмежень під час експлуатації. Втрати в металевих хвилеводах під час передачі електромагнітної енергії зумовлені втратами в діелектрику, яким заповнена конструкція, та в провідних стінках. Для хвилеводів із повітряним заповненням діелектричні втрати зазвичай настільки малі, що їх можна не враховувати. Натомість втрати у провідних стінках є основним фактором, спричиненим обмеженою провідністю матеріалу хвилеводу.

Під час проходження електричного струму через провідник частина електричної енергії перетворюється в тепло, що посилюється через явище скін-ефекту. Це явище призводить до зменшення амплітуди електромагнітної хвилі при її проникненні вглиб провідного середовища. Зі зростанням частоти товщина скін-

шару зменшується, що підвищує щільність струму у поверхневому шарі провідника, спричиняючи зростання активного опору та погонних втрат.

Розрахунки погонних втрат для хвилеводів із різними перерізами, зазначені в табл.2.3.

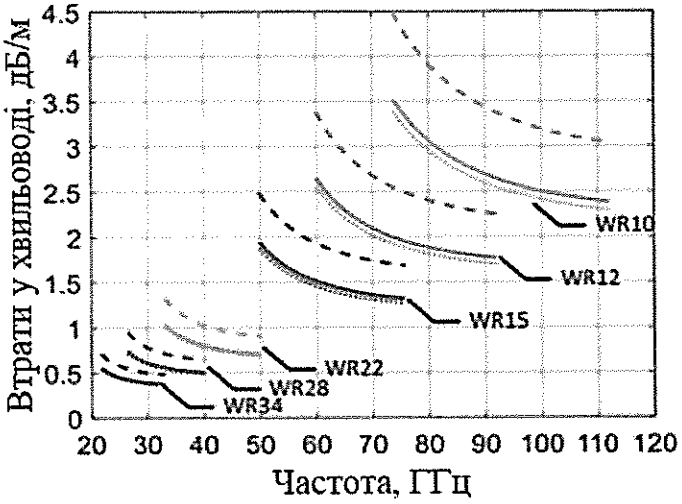


Рис. 2.12. Суцільні лінії показують втрати для хвилеводів зі стінками з міді, крапки – зі срібла, яке зазвичай використовується як покриття, а штрихова лінія – для алюмінію.

На рисунку 2.12 видно, що втрати в хвилеводах зростають зі збільшенням частоти та зменшенням розмірів поперечного перерізу прямокутного хвилеводу. Це пояснюється збільшенням електричної довжини хвилі та підвищенням щільності поверхневого струму на стінках хвилеводу. Якщо в обраному частотному діапазоні пристрій може працювати в одномодовому режимі з хвилеводами різних розмірів, найменші втрати будуть у хвилеводів із більшим перерізом. Вибір матеріалу провідника і його провідність мають вирішальне значення для конкретної робочої частоти [21].

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ТА ОГЛЯД СИСТЕМИ

У попередньому розділі розглядались фундаментальні характеристики міліметрових хвиль і пояснювалось, чим характеристики міліметрових хвиль в основному відрізняються від традиційних мікрохвильових діапазонів. У даному розділі виконано дослідження моделювання мм-хвильового каналу, доступні проблеми, пов'язані з ним, а також розглянуті великомасштабні та дрібномасштабні компоненти завмирання. Крім того, щоб охарактеризувати модель каналу, яка буде використовуватися в цій роботі, розглянуті міські мікро- та міські макромоделі каналів. Увагу приділено моделі каналу 5G (5GCM), яка буде використана для моделювання та обговорення в цій дипломній роботі.

3.1. Модель каналу міліметрової хвилі

Масштабні вимірювання розповсюдження mmWave різними дослідницькими групами, вимірювальні кампанії та пробне розгортання призвели до можливості використання mmWave для мобільного зв'язку, в результаті чого використання mmWave, здається, стане реальністю для стільникових систем 5G найближчого майбутнього [23,24]. Проте проектування та розгортання ефективної мережі 5G у mmWaves, як і будь-які інші бездротові системи, потребує моделей каналів, заснованих на глибокому розумінні фізичної поведінки та вимірювань для аналізу протоколів сигналізації та радіоінтерфейсів [25].

Класифікація моделей каналів здійснюється за двома категоріями фізичних моделей каналів і моделей каналів на основі аналізу. Основою для аналітичної моделі каналу є математичний аналіз, тоді як побудова фізичної моделі каналу базується на характеристиках поширення сигналу між антенними решітками

передавача та приймача [9]. У цій роботі ми розглянемо стохастичну фізичну модель, яка базується на обширних вимірюваннях, і ця модель є імовірнісною для опису характеристик просторової та часової поведінки багатопрохідних компонентів (MPC). Детермінована модель, як правило, має вищу обчислювальну складність. Іншою перевагою моделей стохастичних каналів є їх менша обчислювальна складність із меншим часом, що робить їх придатними для моделювання та проектування систем [26].

Моделювання зусиль у міліметровому діапазоні. Цілі використання mmWave для різних сценаріїв 5G прискорили моделювання каналів для кар'єрних частот у діапазоні від 2 ГГц до 100 ГГц. Кілька проектів і організацій дослідили та запропонували моделі каналів для різних частотних діапазонів, таких як 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 73 ГГц, а також для різних сценаріїв розгортання, таких як внутрішній, зовнішній, транзитний зв'язок тощо [27].

Увага в дипломній роботі була звузена лише до внесків у моделювання каналів для технології 5G.

У табл.3.1 [28] перераховано низку основних організацій, які внесли свій внесок у моделювання каналів для 5G і для різних середовищ, таких як LOS і NLOS, і різні діапазони частот.

У табл. 3.1 показано внесок чотирьох основних організацій у моделювання каналу mmWave. Нам буде достатньо дослідити ці організації за описами в таблиці, за винятком 5GCM, який буде використовуватися в цій дипломній роботі та пояснюватиметься детально. Зусилля 5G Channel Model базуються на обширних польових вимірюваннях, головним чином на 28 ГГц, 38 ГГц, 60 ГГц і 73 ГГц, проведених NYU WIRELESS [26]. Спочатку вузькосмугова була запропонована в [52], а потім були запропоновані моделі широкосмугового каналу в [20]. У цих моделях каналів розглядалися різні сценарії, включаючи сценарії в приміщенні, на вулиці, від пристрою до пристрою (D2D) і від транспортного засобу до транспортного засобу (V2V), з наголосом на послугах мобільного доступу [9].

Відповідно до [18], хоча багато учасників цих органів стандартизації збігаються, але остаточні моделі дещо «відрізняються», і нещодавня робота виявила розбіжності між запропонованими моделями та виміряними результатами.

Таблиця 3.1.

Моделювання каналу MmWave різними організаціями та зусиллями [9]

Технологія	Частота	Модель каналу	Опис
5G	28 GHz, 38 GHz, and 73 GHz	5GCM	Багато дослідницьких зусиль щодо моделювання каналів міліметрових хвиль, головним чином на частотах 28 ГГц, 38 ГГц і 73 ГГц. Спочатку пропозицію про вузькосмугові, а потім ряд широкосмугових каналів.
5G	до 100 ГГц	METIS	Модель каналу 5G PPP міліметрового діапазону для мобільних систем. Модель відповідає моделюванню каналів WINNER II і WINNER +.
5G	до 100 ГГц	3GPP	Нові моделі каналів серії 3GPP 38.900, які є розширенням 3GPP TR 36.873, зазвичай використовуються для діапазонів нижче 6 ГГц. Поточна модель підтримує азимутальні та висотні характеристики русла.
5G	6-100 GHz	mmMAGIC	Ініціатива Європейської комісії щодо дослідження використання mmWaves для 5G. mmMAGIC створив моделі каналів на основі інтенсивного моделювання та перевірки, використовуючи велику кількість даних із 22 кампаній вимірювання каналів.

Це показує, що є кілька проблем моделювання, в яких розроблені моделі на даний момент не можуть адекватно відобразити всі особливості mmWaves. У наступному підрозділі ми коротко розглянемо деякі з цих проблем.

Аналіз особливостей моделювання каналу міліметрових хвиль

Численні моделі каналів були розроблені та існують у літературі, оскільки основні з них були підсумовані в таблиці 3.1 у попередньому розділі. Однак, виходячи з випадків використання mmWave, особливо для 5G, величезної пропускної здатності та природи mmWave, ці моделі не можуть відображати всі характеристики mmWave. Основна проблема полягає в тому, щоб розробити модель єдиного каналу, яку можна було б використовувати в усьому спектрі мм-хвиль, лише змінюючи параметри щодо несучої частоти, сценарію або на основі використовуваного середовища [9]. Деякі організації визнали це, але [15] стверджували, що це неможливо.

Основні обмеження розроблених на даний момент моделей каналів коротко виділені в таких областях, як відсутність вимірювань, доступність великої смуги пропускання, випадки подвійної мобільності, спрямовані антени та масивне використання елементів решітки, які є одними із складних обмежень для моделювання каналу mmWave [18].

Незважаючи на те, що mmWaves проводив масштабні вимірювальні кампанії, широкий спектр mmWaves потребує подальшого вивчення. Попередні моделі були розроблені для вузьких діапазонів нижче 6 ГГц, у яких використання величезної смуги пропускання mmWave накладає деякі обмеження. У зв'язку між пристроями (D2D), коли обидва вузли рухаються, очікується більший доплерівський розкид, який впливає на канал. Використання спрямованих антен разом із масивними антенними решітками або масивним MIMO на mmWaves пом'якшить вищий доплерівський розкид і високі загасання, і це необхідно враховувати при моделюванні каналу [19].

3.2. Дослідження конструкції системи

Загальна структура міліметрового каналу. У мм-хвильовому каналі агрегація різних багатоканальних компонентів із коротким інтервалом символів формує імпульсну характеристику каналу. Кластер можна визначити як декілька MPC, які мають подібні темпо-просторові характеристики [19]

Модель агрегованої матриці каналів наведено в [19].

$$H(t) = \sum_{ncl}^{Ncl} \sum_{p}^{Np} Hncl, p(t) \tag{3.1}$$

де N_{cl} показує загальну кількість агрегованих кластерів, а Np – кількість променів у кластері, тоді як H_{ncl}, p (t) – це один багатопроменевий промінь p-го в ncl-му кластері в момент часу t. У літературі втрати на шляху зазвичай розглядаються в сценаріях LOS і NLOS. Нижче ми коротко пояснимо кожен сценарій.

Імовірнісна модель LOS. У літературі про mmWave прийнято окремо описувати втрати на шляху для умов LOS і NLOS. Таким чином, необхідна модель, щоб передбачити, чи знаходиться користувальницьке обладнання (UE) в межах чіткої LOS базової станції (BS) або йому заважає бути в регіоні NLOS [18]. Імовірність LOS не залежить від частоти та моделюється як функція відстані між передавачем і приймачем, на яку може вплинути розташування середовища.

Імовірність UMi LOS. Як було зазначено в попередньому розділі, сценарій UMi визначено для зон із високою щільністю користувачів із відстанню між сайтами (ISD) до 200 м і висотою базової станції нижче дахів. Різні організації розробили ймовірнісні моделі UMi LOS, як показано в табл.3.2 [18] нижче. Нам буде достатньо пояснити 5GCM, який буде використовуватися в цій дисертації та буде пояснено докладно.

Таблиця 3.2

Моделі ймовірності LOS 5GCM у сценаріях UMi та UMa

UMi	d1/d2 model: $P_{LOS}(d_{2D}) = \min(d1/d_{2D}, 1)(1 - \exp(-d_{2D}=d2)) \div \exp(-d_{3D}=d2)$ NYU (squared) model: $PLOS(d_{2D}) = (\min(d1/d_{2D}, 1)(1 - \exp(-d_{2D}/d2)) + \exp(-d_{2D}=d2))2$	d1/d2 model: d1 = 20 m, d2 = 39 m NYU (squared) model: d1 = 22 m, d2 = 100 m
UMa	d1/d2 model: $P_{LOS} = (\min(d_1=d_{2D}, 1)(1 - \exp(-d_{2D}/d2)) + \exp(-d_{2D}/d2))(1 + C(d_{2D}, h_{UE})$ NYU (squared) model: $P_{LOS} = ((\min(d1/d_{2D}, 1)(1 - \exp(-d_{2D}/d2)) + \exp(-d_{2D}/d2))(1 + C(d_{2D}, h_{UE})))^2$	d1/d2 model: d1 = 20 m, d2 = 66 m NYU (squared) model: d1 = 20 m, d2 = 160 m

У табл.3.2 показано внесок 5GCM [25] для сценаріїв UMi та UMa, який представив дві ймовірнісні моделі LOS у кожному сценарії.

Імовірність UMa LOS. У сценарії Urban Macrocell (UMa) висота UE знаходиться на рівні землі на рівні 1,5 м, а базові станції зазвичай встановлюються над дахом на висоті 25-30 м, а з ISD до 500 м [31]. У попередній табл.3.2 [18] також наведені ймовірності UMa LOS, які ідентичні ймовірності UMi LOS, лише з відмінностями у значеннях d1 і d2.

Великомасштабні моделі втрат на шляху. З трьох основних типів великомасштабних моделей втрат на шляху, які використовуються для прогнозування потужності сигналу на відстанях, ми використовуємо базову модель відстані у вільному просторі (CI) із опорною відстанню 1 м у цій роботі. Втрати на шляху CI залежать від частоти та використовують опорну відстань наближеної сторони відповідно до закону Фріса та наведеного [48], [54]:

$$\mathrm{PL}^{CI}(f_c, d_{3D})[dB] = FSPL)(f_c, 1m) + 10nlog10(d_{3D}) + x\sigma^{CI} \qquad (3.2)$$

де $\chi\sigma^{CI}$ — тіньове загасання (SF) як нульове середнє гауссове випадкове значення зі стандартним відхиленням у дБ, n — показник втрат на шляху (PLE), d_{3D}> 1m, FSLP) (fC, 1m) — втрати на шляху вільного простору на частоті f_C у ГГц на 1 м, а FSPL розраховується як:

$$FSPL(f_c, 1m)[dB] = 20log10\left(4\pi fcx10^{\frac{9}{c}}\right) = 32.4 + 20log10(f_c)[dB] \quad (3.3)$$

де с – швидкість світла у вакуумі, 3 х 108 м/с. CI пов'язує втрати на шляху різних частот із втратами на шляху вільного простору на 1 м відповідно до закону Фріса, і дослідники повідомляють, що він показав більшу точність і меншу складність [50], порівняно з іншими. Моделі втрат на шляху зазвичай створюються всенаправленими з припущенням антен з одиничним посиленням [18].

Широкомасштабний шлях UMi LOS. Сценарій UMi зазвичай розглядається як вуличний каньйон або відкрита площа, як це можна побачити в табл.3.3 [48]. 5GCM [49] вибрав CI для моделювання втрат на шляху UMi LOS.

Таблиця 3.3

Моделі втрат у всенаправленому тракті в сценарії UMi [48]

	PL [dB], f_c is in GHz and d_{3D} is in meters	Shadow fading std [dB]	Applicability range and Parameters
5GCM [12]			
5GCM UMi-Street Canyon LOS	CI model with 1 m reference distance: $PL = 32.4 + 21\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 3.76$	$6 < f_c < 100$ GHz
5GCM UMi-Street Canyon NLOS	CI model with 1 m reference distance: $PL = 32.4 + 31.7\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ ABG model: $PL = 35.3\log_{10}(d_{3D}) + 22.4 + 21.3\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 8.09$ $\sigma_{SF} = 7.82$	$6 < f_c < 100$ GHz
5GCM UMi-Open Square LOS	CI model with 1 m reference distance: $PL = 32.4 + 18.5\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 4.2$	$6 < f_c < 100$ GHz
5GCM UMi-Open Square NLOS	CI model with 1 m reference distance: $PL = 32.4 + 28.9\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ ABG model: $PL = 41.4\log_{10}(d_{3D}) + 3.66 + 24.3\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 7.1$ $\sigma_{SF} = 7.0$	$6 < f_c < 100$ GHz
3GPP TR 38.901 V14.0.0 [101]			
3GPP UMi-Street Canyon LOS	$PL_{UMi-LOS} = \begin{cases} PL_1, & 10\text{ m} \le d_{2D} \le d'_{BP} \\ PL_2, & d'_{BP} \le d_{2D} \le 5\text{ km} \end{cases}$ $PL_1 = 32.4 + 21\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 32.4 + 40\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $-9.5\log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UE})^2)$ where d'_{BP} is specified in Eq. (8)	$\sigma_{SF} = 4.0$	$0.5 < f_c < 100$ GHz $1.5\text{ m} \le h_{UE} \le 22.5$ m $h_{BS} = 10$ m
3GPP UMi-Street Canyon NLOS	$PL = \max(PL_{UMi-LOS}(d_{3D}), PL_{UMi-NLOS}(d_{3D}))$ $PL_{UMi-NLOS} = 35.3\log_{10}(d_{3D}) + 22.4 + 21.3\log_{10}(f_c)$ $-0.3(h_{UE} - 1.5)$ Option: CI model with 1 m reference distance $PL = 32.4 + 20\log_{10}(f_c) + 31.9\log_{10}(d_{3D})$	$\sigma_{SF} = 7.82$ $\sigma_{SF} = 8.2$	$0.5 < f_c < 100$ GHz $10\text{ m} < d_{2D} < 5000$ m $1.5\text{ m} \le h_{UE} \le 22.5$ m $h_{BS} = 10$ m
METIS [102]			
METIS UMi-Street Canyon LOS	$PL_{UMi-LOS}\begin{cases} PL_1, & 10\text{ m} < d_{3D} \le d_{BP} \\ PL_2, & d_{BP} < d_{3D} \le 500\text{ m} \end{cases}$ $PL_1 = 22\log_{10}(d_{3D}) + 28.0 + 20\log_{10}(f_c) + PL_0$ $PL_2 = 40\log_{10}(d_{3D}) + 7.8 - 18\log_{10}(h_{BS}h_{UE})$ $+2\log_{10}(f_c) + PL_1(d_{BP})$ d_{BP} and PL_0 are specified in Eq. (9) and (10)	$\sigma_{SF} = 3.1$	$0.8 \le f_c \le 60$ GHz
METIS UMi-Street Canyon NLOS	$PL = \max(PL_{UMi-LOS}(d_{3D}), PL_{UMi-NLOS}(d_{3D}))$ $PL_{UMi-NLOS} = 36.7\log_{10}(d_{3D}) + 23.15 + 26\log_{10}(f_c) - 0.3(h_{UE})$	$\sigma_{SF} = 4.0$	$0.45 \le f_c \le 6$ GHz $10\text{ m} < d_{2D} < 2000$ m $h_{BS} = 10$ m $1.5\text{ m} \le h_{UE} \le 22.5$ m
mmMAGIC [92]			
mmMAGIC UMi-Street Canyon LOS	$PL = 19.2\log_{10}(d_{3D}) + 32.9 + 20.8\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 2.0$	$6 < f_c < 100$ GHz
mmMAGIC UMi-Street Canyon NLOS	$PL = 45.0\log_{10}(d_{3D}) + 31.0 + 20.0\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 7.82$	$6 < f_c < 100$ GHz
Note : PL is path loss, d_{3D} is the 3D T-R Euclidean distance. All distances or heights are in meters and frequency related values are in GHz, unless it is stated otherwise.			

У моделі втрат на шляху CI визначається лише показник втрати на шляху (PLE), єдиний параметр, щоб мінімізувати помилку моделі середніх втрат на відстані шляхом оптимізації. Однак у плаваючому перетині (FI), також відомому як модель ABG, три параметри, а саме α, β і γ, необхідно оптимізувати, щоб мінімізувати помилку моделі [18].

Широкомасштабний шлях UMa LOS.

5GCM [29] представив три моделі втрат на шляху UMa, CI, CI з частотно-зваженим (CIF) і ABG. ABG і CIF розглядаються для сценарію NLOS, тоді як CI використовується для умови LOS. Моделі втрат на шляху 5GCM та інших організацій пояснюються в табл.3.4 [18] нижче.

Таблиця 3.4

Моделі втрат у всенаправленому тракті в сценарії UMa

	PL [dB], f_c is in GHz, d is in meters	Shadow fading std [dB]	Applicability range and Parameters
5GCM [12]			
5GCM UMa LOS	CI model with 1 m reference distance: $PL = 32.4 + 20\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 4.1$	$6 < f_c < 100$ GHz
5GCM UMa NLOS	CI model with 1 m reference distance: $PL = 32.4 + 30\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ ABG model: $PL = 34\log_{10}(d_{3D}) + 19.2 + 23\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 6.8$ $\sigma_{SF} = 6.5$	$6 < f_c < 100$ GHz
3GPP TR 38.901 V14.0.0 [101]			
3GPP TR 38.901 UMa LOS	$PL_{UMa-LOS} = \begin{cases} PL_1, & 10\text{ m} \le d_{2D} \le d'_{BP} \\ PL_2, & d'_{BP} \le d_{2D} \le 5\text{ km} \end{cases}$ $PL_1 = 28.0 + 22\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 28.0 + 40\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $-9\log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UE})^2)$ where $d'_{BP} = 4h'_{BS}h'_{UE}f_c \times 10^9/c$	$\sigma_{SF} = 4.0$	$0.5 < f_c < 100$ GHz $1.5\text{ m} \le h_{UE} \le 22.5$ m $h_{BS} = 25$ m
3GPP TR 38.901 UMa NLOS	$PL = \max(PL_{UMa-LOS}(d_{3D}), PL_{UMa-NLOS}(d_{3D}))$ $PL_{UMa-NLOS} = 13.54 + 39.08\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $-0.6(h_{UE} - 1.5)$ Option: CI model with 1 m reference distance $PL = 32.4 + 20\log_{10}(f_c) + 30\log_{10}(d_{3D})$	$\sigma_{SF} = 6.0$ $\sigma_{SF} = 7.8$	$0.5 < f_c < 100$ GHz $10\text{ m} < d_{2D} < 5000$ m $1.5\text{ m} \le h_{UE} \le 22.5$ m $h_{BS} = 25$ m
METIS [102]			
METIS UMa LOS	$PL_{UMa-LOS} = \begin{cases} PL_1, & 10\text{ m} \le d_{2D} \le d'_{BP} \\ PL_2, & d'_{BP} \le d_{2D} \le 5\text{ km} \end{cases}$ $PL_1 = 28 + 22\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 28 + 40\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $-9\log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UE})^2)$ where $d'_{BP} = 4(h_{BS} - 1)(h_{UE} - 1)f_c \times 10^9/c$	$\sigma_{SF} = 4.0$	$0.45 < f_c < 6$ GHz $10\text{ m} < d_{2D} < 5000$ m $1.5\text{ m} \le h_{UE} \le 22.5$ m $h_{BS} = 25$ m
METIS UMa NLOS	$PL = \max(PL_{UMa-LOS}(d_{3D}), PL_{UMa-NLOS}(d_{3D}))$ $PL_{UMa-NLOS} = 161.94 - 7.1\log_{10}(w) + 7.5\log_{10}(h)$ $-\left(24.37 - 3.7\left(\frac{h}{h_{BS}}\right)^2\right)\log_{10}(h_{BS})$ $+(43.42 - 3.1\log_{10}(h_{BS}))(\log_{10}(d_{3D}) - 3)$ $+20\log_{10}(f_c) - 0.6(h_{UE})$	$\sigma_{SF} = 6.0$	$0.45 < f_c < 6$ GHz $10\text{ m} < d_{2D} < 5000$ m $1.5\text{ m} \le h_{UE} \le 22.5$ m $h_{BS} = 25$ m $w = 20$ m $h = 20$ m

Модель для густонаселених міст. Серед існуючих моделей каналів, розроблених різними групами, у цій роботі в основному згадуються моделі каналів

5GCM і 3GPP. У цьому дослідженні симулятор NYUSIM [16] використовується для всіх симуляцій, оскільки в [53] було показано, що він має більшу точність, ніж 3GPP. Симулятор NYUSIM був розроблений NYU WIRELESS при Нью-Йоркському університеті та базується на моделюванні каналів 5GCM [19], використовуючи широкі польові вимірювання mmWave у різних містах Сполучених Штатів і Республіки Корея. Для густонаселеного міського середовища цього дослідницького випадку ми розглянемо сценарії UMi та UMa з різними діапазонами частот і з моделями каналів, розробленими 5GCM.

3.3. Оцінка ефективності та порівняння продуктивності

У цьому розділі ми оцінюємо та порівнюємо продуктивність широкомасштабного завмирання mmWave, наприклад втрати на шляху, коефіцієнт затінення та розподіл затримки, шляхом моделювання на трьох розглянутих частотах 28 ГГц, 73 ГГц і 4 ГГц для щільного міського середовища.

3.3.1. Налаштування симуляції

Наша система моделювання, яка складається з параметрів каналу та властивостей антени для розповсюдження міліметрових хвиль поза приміщенням, така. Ми змоделювали частоти 28 ГГц і 73 ГГц для сценарію UMi із смугою пропускання 800 МГц через канал MIMO антенних решіток ULA 16X4. Крім того, для сценарію UMa 4 ГГц із смугою пропускання 200 МГц, що базується на вимогах 3GPP 5G NR, моделюється за допомогою масивів ULA 8X2. Обидва сценарії моделюються в симуляторі NYUSIM [16]. Симулятор NYUSIM використовує підхід Close-in для обчислення втрат на трасі, як обговорювалося в розділі 4. Симулятор містить усі параметри, що впливають на випромінювання мм-хвиль, включаючи великомасштабні параметри прямої видимості (LOS), нелінійні - зору (NLOS) і втрати на шляху, а також дрібномасштабні параметри, такі як ослаблення листя. Діапазон частот розповсюдження симулятора становить від 0,5 ГГц до 100

ГГц і враховує різні сценарії Urban Micro (UMi), Urban Macro (UMa) і Rural Macro (RMa).

Параметри каналу та властивості конструкції антени на симуляторі NYUSIM встановлюються наступним чином. Що стосується властивостей розповсюдження, сценарії UMi та UMa розглядаються як з прямою видимістю (LOS), так і без прямої видимості (NLOS), а відстань поділу TX-RX становить від 10 до 500 м. Атмосферні ефекти, включаючи барометричний тиск, вологість, температуру та швидкість дощу, визначаються як 1015 мбар, 50%, 10 °C і 5 мм/год, типові погодні умови січня в Токіо відповідно. Затухання листя становить 0,4 дБ/м, а відстань між листям встановлюється на 10 м у будь-якому випадково вибраному місці. Параметри каналу та властивості антени встановлюються, як показано в табл.3.4.

Таблиця 3.4

Параметри каналу та властивості антени для сценаріїв UMi та UMa

Параметри каналу	Специфікація	
	Сценарій UMi	Сценарій UMA
Несуча частота	28 GHz, 73 GHz	4 GHz
Пропускна здатність	800 MHz	200 MHz
Висота БС	Висота БС	Висота БС
Температура	10 °C	
Розділення TX-RX	10-500 m	
Кількість місць RX	500	
Ослаблення листя	0.4 dB/m x 10 m	
Відстань у листі	10 m	
Потужність передачі	30 dBm	
Тип масиву TX, Nt	ULA, 16	ULA, 8
Тип масиву RX, Nr	ULA, 4	ULA, 2
Відстань між антенами TX	0.5 λ	
Відстань між антенами RX	0.5 λ	
Модуляція	OFDM	

3.3.2. Результати моделювання

Як було зазначено в попередньому розділі, моделювання було проведено на трьох частотах, які входять до списку частот, які будуть використовуватися в

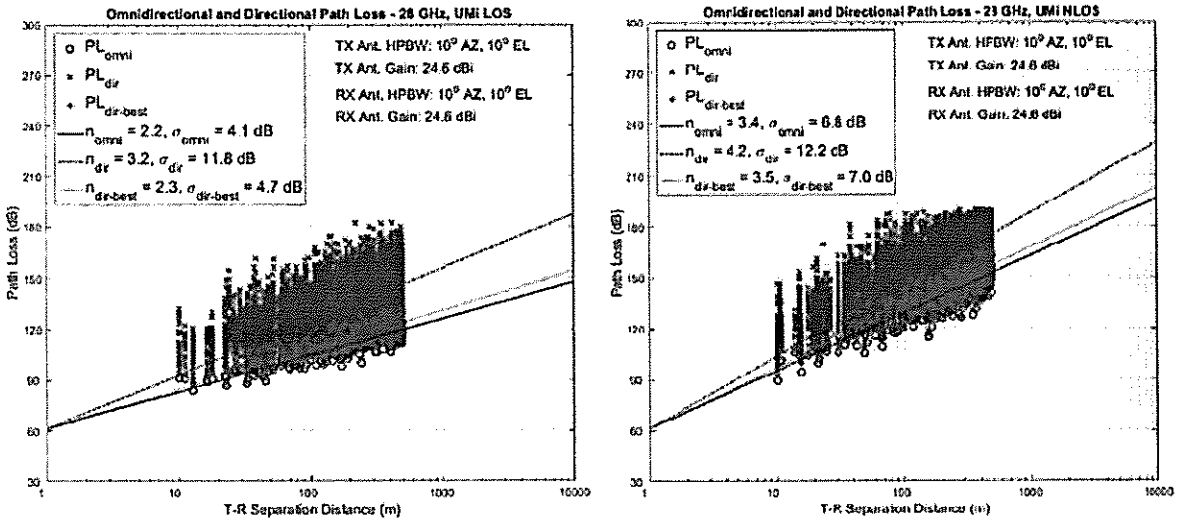
системах доступу 5G, а саме: 28 ГГц і 73 ГГц для сценарію міської мікростільникової (UMi) радіуса не понад 200 метрів і 4 ГГц для міської мікросоти (UMa) до 500 м для густонаселеного міського середовища. Оскільки втрати на шляху та затінення є двома важливими варіаціями у розповсюдженні та визначенні потужності прийнятого сигналу, ми показуємо результати моделювання каналу, витягаючи значення для цих варіацій. Як правило, втрати на шляху та затінення в основному спричинені відстанню передачі та перешкодами на шляху сигналу, тому ми оцінюємо ці варіації для випадків LOS та NLOS за умов спрямованості та всенаправленості для різних відстаней для розглянутих частот. Крім того, спрямовані та всенаправлені профілі затримки потужності (PDP) для кожної розглянутої частоти порівнюються у випадках LOS або NLOS, а також серед змодельованих частот.

Сценарій щільної міської мікрокомірки (UMi). Як ми пояснювали в попередньому розділі, основними характеристиками щільного міського середовища є зовнішнє та зовнішнє покриття всередині приміщень із високим навантаженням транспорту. Враховуючи високі втрати проникнення в mmWave, а також оскільки автори в [12] також запропонували розділити зовнішній і внутрішній доступ 5G, ми зосереджені на цій роботі на зовнішньому сценарії UMi, який, здається, є основним розгортанням 5G для густонаселених міських районів з невеликою кількістю людей. десятки метрів міжсайтової відстані (ISD). У цьому розділі ми дослідимо продуктивність діапазонів 28 і 73 ГГц із діапазоном відстаней TX-RX 200 м і 100 м відповідно для випадків LOS і NLOS. Ефективність кожного випадку розглядатиметься як для всенаправлених, так і для спрямованих умов. PDP випадків LOS також порівнюються для умов спрямованості та всенаправленості для кожної використовуваної частоти на випадковій відстані TX-RX.

Продуктивність 28 ГГц. У нашому моделюванні першою несучою частотою є діапазон частот 28 ГГц. Смуга частот 28 ГГц користується великим інтересом і популярністю для майбутнього доступу 5G mmWave, хоча вона була виключена з номінованих діапазонів WRC-15 для розгортання IMT-2020 [12]. Крім того, згідно з 5GMF [30], більшість вимірювань поля mmWave для 5G в Японії проводяться на

частотах 28 ГГц і 4 ГГц, які, ймовірно, мають підтримку японського уряду на WRC-19 для діапазонів 5G.

Результати моделювання спрямованих і всенаправлених втрат на шляху, агрегованого показника втрат на шляху (PLE) і спрямованого найкращого PLE для випадків LOS і NLOS показано на рис.3.1. На рисунку зображено продуктивність на 500 випадково вибраних RX симулятором NYUSIM [56] в діапазоні від 10 м до 500 м, як нижню та верхню межі від TX відповідно, і за параметрами каналу, описаними в попередньому розділі.



(a) (b)

Рис. 3.1. Значення втрат у всенаправленому та спрямованому трактах,

На рис. 3.1 показано, що втрати на шляху лінійно зростають зі збільшенням відстані, і вони вищі для спрямованого розповсюдження в обох випадках і навіть найвищі в умовах NLOS. На рис. 3.1 (а) показано, що спрямована PLE на 3,2 з коефіцієнтом затінення (SF) σ_{dir}=11,8 дБ вище, ніж всенаправлена PLE 2,2 і σ_{omni}=4,1 дБ, як в літературі для LOS. Однак найкращий спрямований PLE або найсильніший можливий зв'язок, створений на спрямованому шляху, дуже близький до всеспрямованого PLE. Крім того, як показано на рис. 3.1 (b), втрати на шляху росту зростають швидше для сценарію NLOS, ніж для сценарію LOS, щодо збільшення відстані через перешкоди на шляху сигналу. Для спрямованого шляху у випадку

NLOS PLE збільшується до 4,2 і з коефіцієнтом затінення 12,2, дБ, але з найкращим спрямованим значенням лише 0,1 і 0,2 дБ, PLE і SF відповідно, вище, ніж у всенаправленому поширенні. Результати свідчать про те, що вищий напрямок PLE як для випадків NLOS, так і для LOS на частоті 28 ГГц, ймовірно, тому, що антенні решітки часто не вирівнюються оптично по проекції. Цю проблему можна вирішити за допомогою антен із керованим променем, як досліджено в [19]. Результати також свідчать про те, що втрати на всенаправленому шляху розповсюдження на 28 ГГц не є значно вищими, ніж у поточних мікрохвильових системах у сценарії UMi.

На рис. 3.2 показано профіль затримки спрямованої потужності (PDP) із найвищою потужністю та всенаправлений PDP для 28 ГГц у випадково вибраному місці RX на відстані 200,8 м у корпусі UMi LOS.

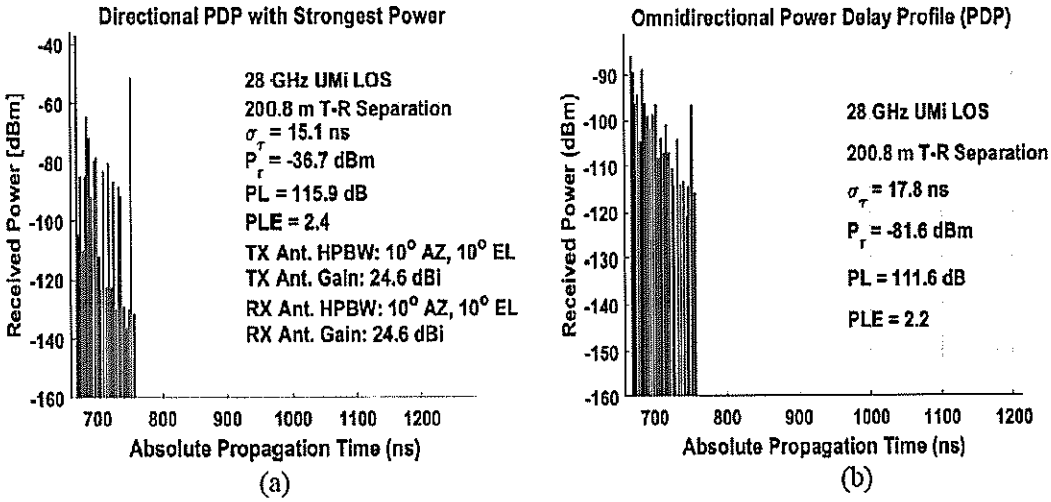
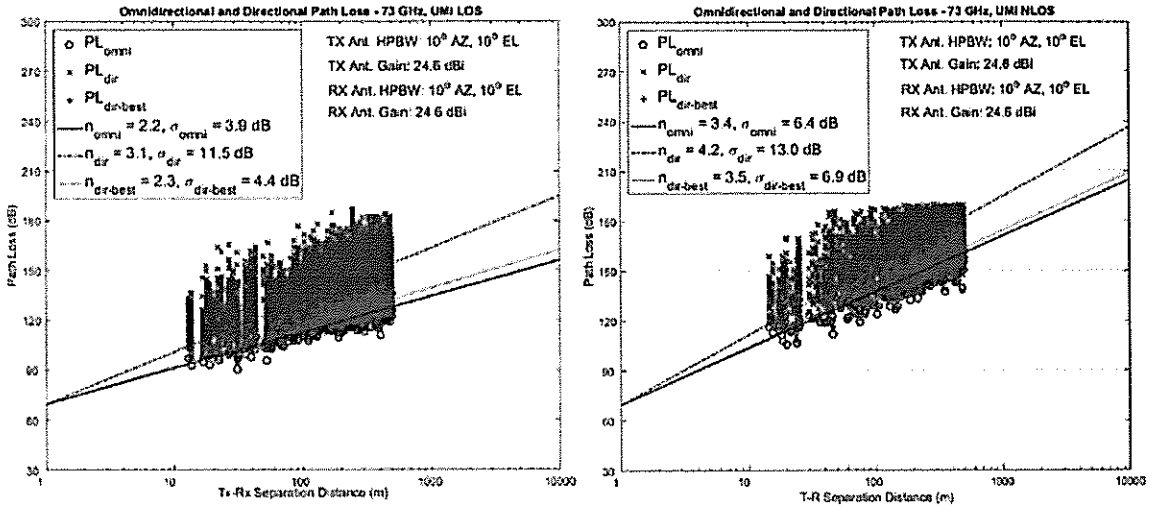


Рис. 3.2 Профілі всенаправленої PDP і спрямованої затримки живлення з найбільшою потужністю на 28 ГГц на відстані 200,8 м TX-RX у корпусі UMi LOS.

Втрати на шляху та PLE як для спрямованих, так і для всенаправлених умов демонструють невелику різницю, як це також можна побачити для середньоквадратичного розкиду затримки (σт) із короткою різницею в часі. Однак потужність прийнятого сигналу для всеспрямованого більш ніж у два рази слабша, ніж для спрямованого. Результати моделювання також можна порівняти з

польовими вимірюваннями в [6], [20] і [46]. Результати свідчать про те, що спрямоване поширення у випадку LOS не набагато більше, ніж всенаправлене для менших комірок до 200 м на 28 ГГц.

Продуктивність 73 ГГц. Діапазон 73 ГГц є ще однією популярною частотою, яка привернула інтерес з боку наукових кіл для досліджень і промисловості для комерційних застосувань. Дослідники досягли бездротового з'єднання зі швидкістю кілька гігабіт на секунду на частоті 73 ГГц, і деякі компанії також використовували його для випробувань 5G. Це все ще популярний діапазон частот для розгортання 5G у міських районах.Результати моделювання діапазону 73 ГГц для спрямованих і всенаправлених втрат на шляху, PLE і найкращого спрямованого PLE для випадків LOS і NLOS показано на рис. 3.3.



(a) (b)

Рис. 3.3. Значення втрат на всенаправленому та спрямованому шляху, згенеровані за допомогою 500 прогонів моделювання для UMi 73 ГГц, (a) сценарії LOS та (b) NLOS

Подібно до 28 ГГц, рис. 3.3 показує, що втрати на шляху лінійно зростають зі збільшенням відстані, і вони вищі для спрямованого розповсюдження в обох випадках.

На рис. 3.3 (a) показано, що PLE і SF 73 ГГц менші, ніж 28 ГГц за однакових умов каналу. З іншого боку, на рис.3.3 (b) показано, що для випадку NLOS на частоті 73 ГГц компоненти багатопроменевого поширення (MPC) не можна виявити як порогове значення мінімальних втрат на шляху 168 дБ, як було встановлено для вимірювальної кампанії в [19]. Результати свідчать про те, що 73 ГГц застосовні як для LOS, так і для NLOS в ISD менше ніж 100 м для стільникових мереж у густонаселених міських районах, як показано в [51].

На рис.3.4 показано PDP для спрямованого та всенаправленого розповсюдження на частоті 73 ГГц на 101,9 м. Подібно до 28 ГГц, є невеликі відмінності в PLE і PL. Однак можна побачити, що відношення всеспрямованого розкиду затримки до спрямованого $\sigma\tau$ у цьому випадку UMi LOS становить приблизно 4 рази, що вище, ніж у польових вимірювань [46]. Результати свідчать про те, що всеспрямований розкид затримки для LOS на частоті 73 ГГц більший, тим часом він отримує набагато більшу кількість багатопроменевого компонента, ніж спрямоване розповсюдження.

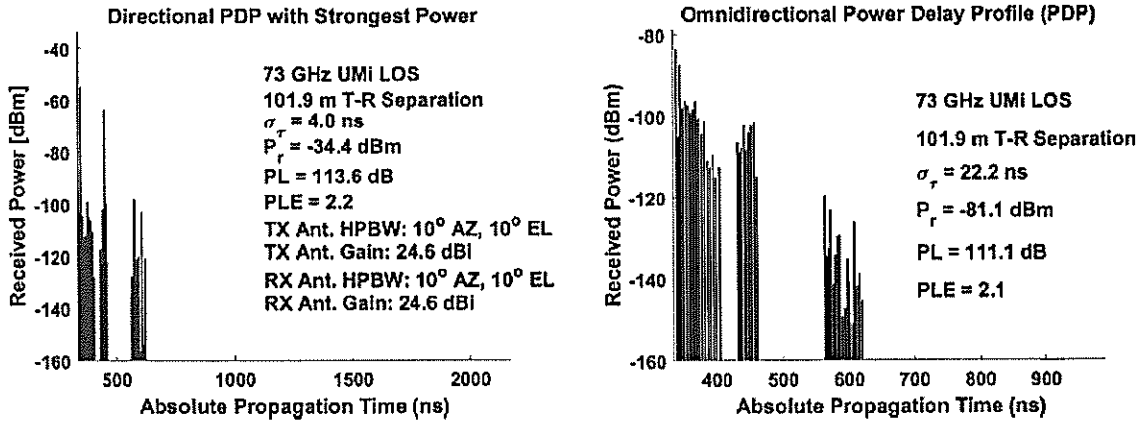


Рис. 3.4. Профілі всенаправленої PDP і спрямованої затримки живлення з найбільшою потужністю на частоті 73 ГГц у корпусі UMi LOS на відстані 101,9 м.

Сценарій щільного міського макроса (UMa)

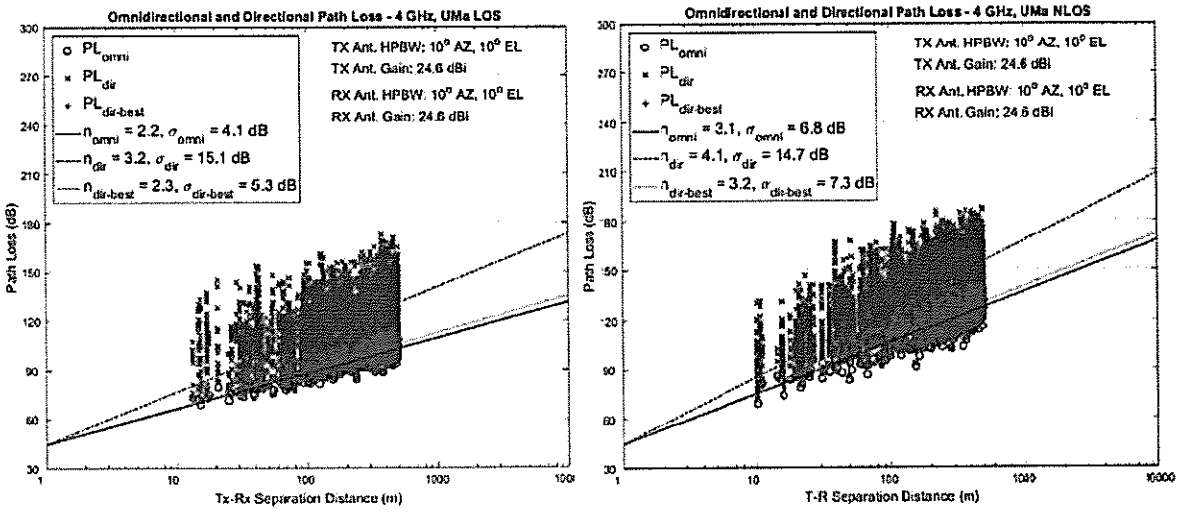
Міський макросценарій для розгортання міліметрових хвиль було проілюстровано у другому розділі на основі визначення 3GPP [31]. ISD для цього

сценарію становить до 200 м, оскільки наша частота становить 4 ГГц, для цього випадку ми розглянемо стільникові радіостанції 500 м.

Продуктивність 4 ГГц

Частота 4 ГГц нещодавно привернула багато уваги, оскільки була серед діапазонів, які будуть виділені для 5G на WRC-19. Деякі країни, такі як Японія, вже почали польові вимірювання та випробування на цій частоті [23].

Подібно до 28 ГГц і 73 ГГц, ми також розглянемо втрати на шляху, PLE і найкращий PLE для діапазону 4 ГГц. Однак для PDP випадок NLOS розглядався для 4 ГГц. На рис.3.5 показано змодельовані втрати на шляху для різних умов.



(a) (b)

Рис. 3.5. Значення втрат у всенаправленому та спрямованому тракті, згенеровані за допомогою 500 прогонів моделювання для 4 ГГц UMa, (a) сценаріїв LOS та (b) NLOS.

На рис.3.5 значення втрат у всенаправленому та спрямованому тракті, отримані за допомогою 500 прогонів моделювання для 4 ГГц UMa (a) LOS та (b) NLOS Оскільки 4 ГГц є діапазоном нижче 6 ГГц, на основі рекомендації 3GPP [31] широка смуга пропускання до 200 МГц може використовуватися в цьому діапазоні для застосування в 5G. На рис. 3.5 показано, що PLE як LOS, так і NLOS 4 ГГц подібний до 28 ГГц і 73 ГГц. Однак на рис. 3.5 (a) показано, що SF при σ_{dir}=15,1 дБ є більшим, ніж обидві попередні частоти. Аналогічно, коефіцієнт тіні для NLOS

більший, ніж для інших досліджуваних частот. Далі спостерігатимемо продуктивність PDP для цього діапазону частот на рис. 3.6.

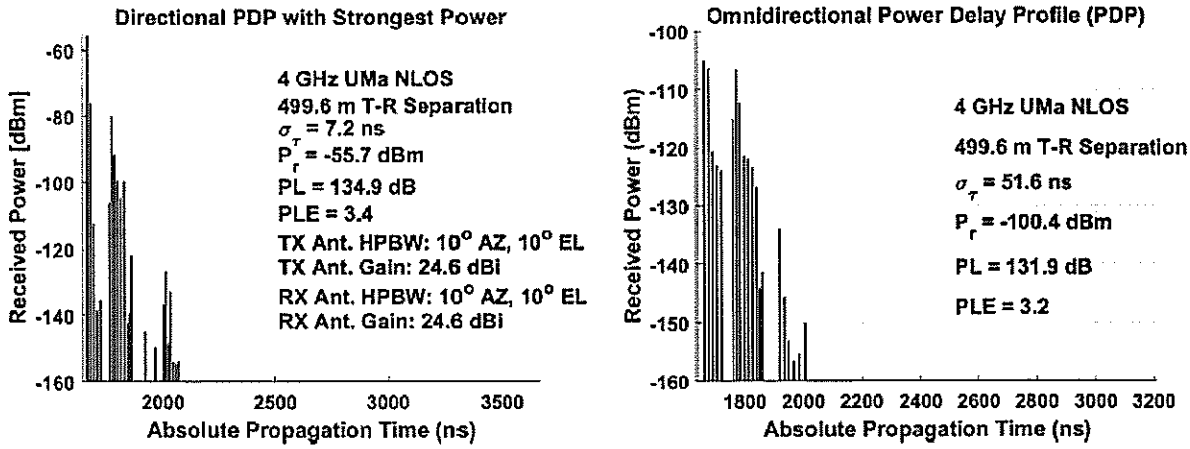


Рис. 3.6. Профілі всенаправленої PDP і спрямованої затримки потужності з найбільшою потужністю на частоті 4 ГГц на висоті 499,6 м UMa NLOS. «Мураха». позначає антену

На рис.3.6 показано PDP для спрямованого та всенаправленого розповсюдження на частоті 4 ГГц на відстані 499,6 м TX-RX. Подібно до 28 ГГц і 73 ГГц, PLE і PL близькі за значеннями в кожному випадку. Однак можна побачити, що відношення всенаправленого розкиду затримки до спрямованого, σ_τ у цьому випадку UMa NLOS становить близько 7 разів, що узгоджується з вимірюваннями поля [46]. Результати свідчать про те, що для випадку NLOS на частоті 4 ГГц у діапазоні 500 м можна виявити низку множинних компонентів із порівнянними втратами на трасі з іншими мм-хвильовими частотами.

Результати цього дослідження показують, що розглянуті діапазони частот mmWave мають можливість використовуватися в мобільній мережі 5G, подолавши деякі проблеми поширення, для всіх сценаріїв. Моделювання показало, що розповсюдження в мікроелементах у випадках LOS і NLOS має втрати на шляху в межах компенсованого діапазону розповсюдження. Результати також показують, що використання мікроелементів менше 100 м для 73 ГГц, 200 м для 28 ГГц і до 500 м для 4 ГГц підійде для передачі доступу 5G. Однак слід взяти до уваги, що,

виходячи зі звіту в [46], ймовірність відключення для 28 ГГц у межах 200 м становить близько 20 %, але вона різко зростає до 57 % за межами 200 м.

ВИСНОВКИ

Отже, у роботі розглянуто поточний стан впровадження технологій 5G, визначено ключові технології 5G у країнах Європи і визначено, наскільки диверсифіковані технологічні профілі країн порівняно з ключовими лідерами в телекомунікаційній галузі — США, Китаєм і Республікою Корея. Таким чином, аналіз показав, що більшість країн ЄС спеціалізуються на технологіях, пов'язаних з обробкою даних, отриманих із мереж 5G, тоді як технології, необхідні для створення та вдосконалення роботи вишок менш поширені. Ця особливість потенційно може бути причиною збереження технологічної залежності країн ЄС від імпортних рішень.

Крім того, виявилося, що незважаючи на те, що найбільша кількість патентів у сфері 5G спостерігається у Швеції, Німеччині, Фінляндії та Франції, серед країн ЄС з'являються нові лідери за кількістю спеціалізацій — Іспанія, Бельгія. , Австрії та Данії. Тому майбутній аналіз розвитку 5G в ЄС повинен враховувати не лише масштаби винаходів, а й характер спеціалізації країн. Також можна припустити, що позиції ЄС на світовому ринку 5G могли б покращитися, якби країни спеціалізувалися на більш рідкісних і складніших технологіях і покращили координацію національних політик у цій сфері.

Аналізуючи ситуацію з впровадженням технологій 5 покоління в Україні, варто зауважити, що дана технологія ще на стадії розрахунку та аналізу, але вже активно тестується провідними компаніями країни.

Досліджено ключові технології на базі я ких реалізується мережа 5G, із-за допомогою яких мережа досягає значних показників якості. Розглянуто архітектуру базової мережі 5 покоління, на відміну від своїх попередників, базова мережа 5G базується на архітектурі, що базується на послугах, що підкреслює модульність, гнучкість та ефективність.

Зв'язок міліметрового діапазону є ключовою технологією для реалізації Інтернету речей у мережах 5G і поза ними. Мною досліджено характеристики розповсюдження мм-хвиль у щільному міському середовищі для гетерогенної

мережі 5G. Результати цього дослідження показують, що mmWave має можливості для використання в стільникових зовнішніх мережах 5G, долаючи деякі проблеми поширення для масового підключення в густонаселених міських районах.

Розглянуто характеристики розповсюдження міліметрових хвиль і підкреслили відмінності, які показують mmWaves з точки зору більшого ослаблення дощу та атмосфери та більшої чутливості до блокування порівняно з традиційним бездротовим зв'язком. Проаналізовано моделювання каналів mmWave та представлено деякі реалізовані моделі каналів.

Представлено оцінку продуктивності мм-хвильових діапазонів 28 ГГц, 73 ГГц і 4 ГГц у щільному середовищі UMi та UMa. Результати показали, що розповсюдження в цьому середовищі у випадках LOS та NLOS має втрати на шляху в межах компенсованого діапазону розповсюдження. Однак втрати на шляху у випадку NLOS для спрямованого розповсюдження вищі порівняно з втратами на всенаправленому шляху та швидко зростають із збільшенням відстані.

Підсумовуючи, великомасштабні характеристики досліджуваних діапазонів мм-хвиль продемонстрували хороший потенціал для використання в густонаселеній міській зоні. Вважається, що спрямовані антенні решітки з високим коефіцієнтом посилення з масивним MIMO подолають серйозні проблеми з втратою на трасі за деяких конкретних обставин.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. A. Gupta and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," in IEEE Access, vol. 3, pp. 1206-1232, 2015.

2. C. Wang, J. Bian, J. Sun, W. Zhang, and M. Zhang, "A Survey of 5G Channel Measurements and Models," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 4, pp. 3142-3168, Fourth quarter 2018.

3. M. Shafi et al., "5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 6, pp. 1201-1221, June 2017.

4. A. Abrol and R. K. Jha, "Power Optimization in 5G Networks: A Step towards GrEEn Communication," in IEEE Access, vol. 4, pp. 1355-1374, 2016.

5. S. Parkvall, E. Dahlman, A. Furuskar, and M. Frenne, "NR: The New 5G Radio Access Technology," in IEEE Communications Standards Magazine, vol. 1, no. 4, pp. 24-30, Dec. 2017.

6. M. Giordani, M. Polese, A. Roy, D. Castor and M. Zorzi, "A Tutorial on Beam Management for 3GPP NR at mmWave Frequencies," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 1, pp. 173-196, Firstquarter, 2019.

7. J. Liu et al., "Initial Access, Mobility, and User-Centric Multi-Beam Operation in 5G New Radio," in IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 3, pp. 35-41, March 2018.

8. Y. Wu, Y. Gu, and Z. Wang, "Channel Estimation for mmWave MIMO With Transmitter Hardware Impairments," in IEEE Communications Letters, vol. 22, no. 2, pp. 320-323, Feb. 2018.

9. M. Alsenwi, N. H. Tran, M. Bennis, A. Kumar Bairagi and C. S. Hong, "eMBB-URLLC Resource Slicing: A Risk-Sensitive Approach," in IEEE Communications Letters, vol. 23, no. 4, pp. 740-743, April 2019.

10. T. S. Rappaport et al., "Wireless Communications and Applications above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond," in IEEE Access, vol. 7, pp. 78729-78757, 2019.

11. J. Li, L. Xiao, X. Xu, and S. Zhou, "Robust and Low Complexity Hybrid Beamforming for Uplink Multiuser MmWave MIMO Systems," in IEEE Communications Letters, vol. 20, no. 6, pp. 1140-1143, June 2016.

12. A. Omri, M. Shaqfeh, A. Ali, and H. Alnuweiri, "Synchronization Procedure in 5G NR Systems,"in IEEE Access, vol. 7, pp. 41286-41295, 2019.

13. M. Giordani, M. Polese, A. Roy, D. Castor, and M. Zorzi, "Standalone and Non-Standalone Beam Management for 3GPP NR at mmWaves," in IEEE Communications Magazine, vol. 57, no. 4, pp. 123-129, April 2019.

14. L. Khaled B.et al. "The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks." IEEE Communications Magazine, vol. 57, no. 8, pp. 84-90, 2019.

15. Yuan, Y., Zhao, Y., Zong, B., & Parolari, S, "Potential key technologies for 6G mobile communications", in Science China Information Sciences, 63, pp. 1-19, Aug. 2020.

16. N. Hassan, K. A. Yau and C. Wu, "Edge Computing in 5G: A Review," in IEEE Access, vol. 7, pp. 127276-127289, 2019.

17. S. Zhang, H. Zhang and L. Song, "Beyond D2D: Full Dimension UAV-to-Everything Communications in 6G," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 6, pp. 6592-6602, June 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.2984624.

18. P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and S. Li, "6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques," in IEEE Network, vol. 33, no. 4, pp. 70-75, July/August 2019.

19. F. Tariq, M. Khandaker, K.-K. Wong, M. Imran, M. Bennis, and M. Debbah, "A speculative study on 6G," arXiv preprint arXiv:1902.06700, 2019

20. T. S. Rappaport et al "Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular: It will work!" IEEE Access, vol. 1, pp. 335-349, May 2013.

21. A. Gupta and R. K. JHA, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies" IEEE Access, Vol. 3, pp. 1206-1232, July 2015.

22 Cheng Xiang Wang et al. "Cellular Architecture and key technologies for 5G wireless communication", IEEE Comm. Magazine, Vol., pp. 121-130, Feb. 2014.

23. W. Xiang, K. Zheng, X. Shen, 5G Mobile Communications, Switzerland: Springer International Publishing, 2017.

24. P. Agyapong, M. Iwamura, D. Staehle, W. Kiess, and A. Benjebbour, ''Design considerations for a 5G network architecture,'' IEEE Comm. Mag., Vol. 52, No. 11, pp. 65–75, Nov. 2014.

25. J. Zhang et al., "5G Millimeter-Wave Antenna Array: Design and Challenges" IEEE Wireless Communications, pp. 106-112, April 2017.

26. Diego Dupleich, et al., "A Hybrid Polarimetric Wide-Band Beam-former Architecture for 5G mm-Wave Communications. WSA 2016 Munich, Germany, pp 32-39.

27. J. G. Andrews, et al., "What Will 5G Be?", IEEE Journal on selected areas in communications, Vol. 32, No. 6, pp. 1065-1077, June 2014.

28. H. Zhao et al., "28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York city," in Proc. IEEE Int. Conf. Comm. (ICC), Budapest, Hungary, pp. 5163–5167, Jun. 2013.

29. T. S. Rapport et al., "Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design" IEEE Trans. on Comm., Vol. 63, No. 9, pp. 3029-3056, Sep. 2015.

30. T. S. Rapport et al., "Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design" IEEE Trans. on Comm., Vol. 63, No. 9, pp. 3029-3056, Sep. 2015.

31. Ge X., et al. "5G Ultra-Dense Cellular Networks", in IEEE Wireless Communications, pp. 72-79, Feb. 2016.

ДЕМОНСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ (Презентація)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра мобільних та відеоінформаційних технологій

ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТА

на тему:
«МЕТОДИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ»

Виконав: здобувач вищої освіти гр.АРДМ-61
Микита ВОВКОТРУБ
Керівник: к.т.н., доцент
Наталія РУДЕНКО

2 Мета та завдання магістерської роботи

Мета роботи - дослідження та реалізація інноваційних рішень для вирішення проблем, пов'язаних із сильним загасанням, конструкцією антени та обмеженням характеристик розповсюдження для систем і програм із підтримкою 5G mmWave.

Об'єкт дослідження – процес підвищення показників якості систем і програм із підтримкою 5G mmWave

Предмет дослідження – антенні решітки для використання в портативних пристроях і системах mmWave

Завдання:

- Аналіз поточного стану та перспективи розвитку технології 5G в Україні і світі;
- Дослідження особливостей реалізації мережі та характеристики міліметрового діапазону частот;
- Моделювання каналу міліметроводіапазонута огляд системи.

3 Стан впровадження технологій 5G

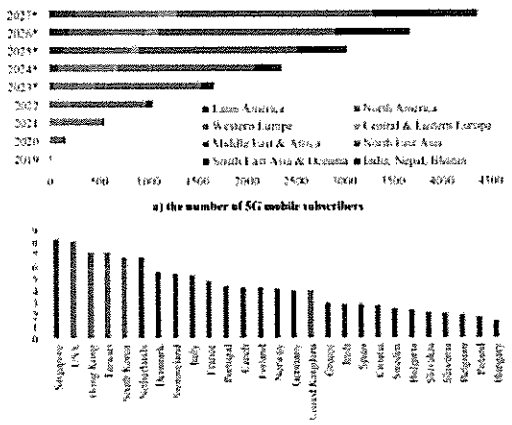


Рис. 1. Кількість абонентів 5G у світі

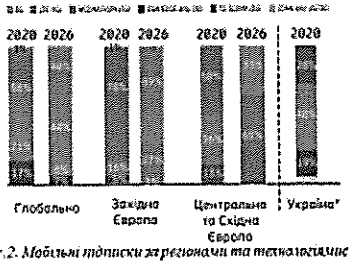


Рис.2. Мобільні підписки за регіонами та технологіями

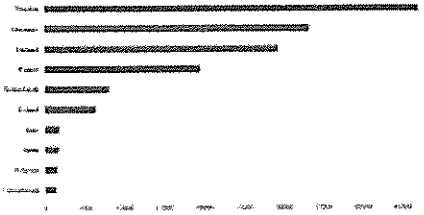


Рис. 3. Лідери за кількістю зареєстрованих патентних заявок на технології 5G серед країн Європи

4 Переваги та перспективні напрямки використання 5G

Переваги 5G порівняно з 4G

- *Різні радіочастоти. 4G працює на частотах нижче 6 ГГц, тоді як 5G — в діапазоні від 30 ГГц до 300 ГГц. Високі частоти забезпечують високу місткість мережі і великі швидкості передачі. Також вежі 4G видають сигнал у всі напрямки, навіть туди, де підключення не потрібне. 5G передає дані на коротких хвилях, забезпечуючи більш точне регулювання напрямку.*
- *Реальний час реагування та мінімізація затримок. Однією з найважливіших особливостей 5G є зниження латентності. Затримка, або латентність — часовий інтервал між відправкою та отриманням даних. У 5G цей показник може бути до 5 мілісекунд, у порівнянні з 50-200 мілісекундами в мережах 4G.*
- *Збільшення пропускної здатності. 5G може обслуговувати більше пристроїв одночасно. Це особливо важливо для Інтернету речей, де мільйони пристроїв потребують одночасного підключення.*

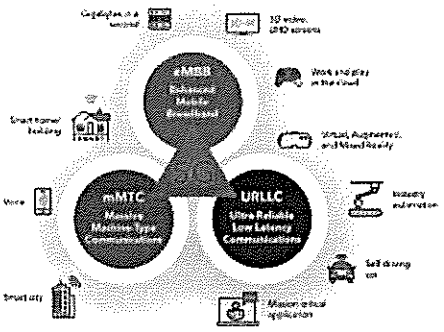


Рис.3. Перспективні напрямки використання 5G

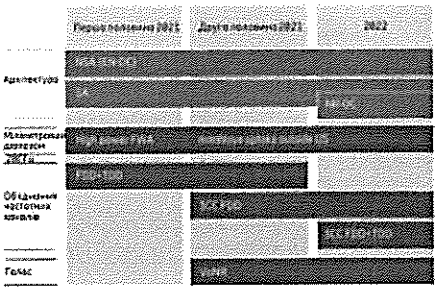


Рис.4. Готовність ринку до технології 5G

5 Технологічні рішення реалізації мережі

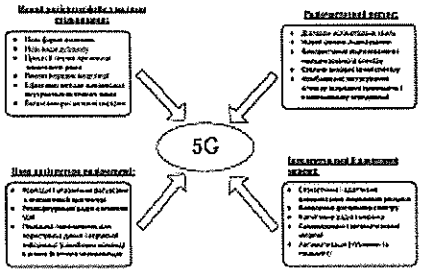


Рис.4. Загальні вимоги до 5G

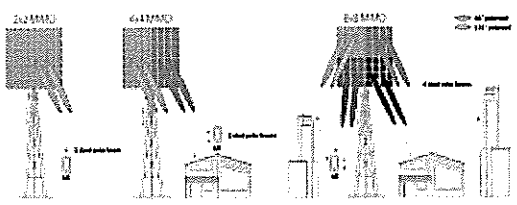


Рис.5. Системи множинного доступу: неортогональний множинний доступ (NOMA) (е)

Табл.1. Порівняння між (UDN) і традиційною стільниковою мережею

Параметри	UDN	Традиційна стільникова мережа
Сценарії розгортання	Вищий, гарячі точки	Широке охоплення
Щільність точки доступу	Порівняно з щільністю користувачів	Мінімізує, ніж щільність користувачів
Типи точок доступу	Small cell, pico, femto, UE relay, relay	Базова станція Macro-типу
Тривалість покриття	Близько 10 м	Кілька сотень метрів і більше
Характеристики покриття	Нерівномірний, нерегулярний	Однорідна, звичайна клітина
Щільність користувачів	Високий	Низький середній
Зворотний зв'язок	Ідеальний/недосконалий, пропускний/безпропускний	Низький середній
Мобільність користувача	Мала мобільність	Висока мобільність
Вимога до швидкості передачі даних	Високий	Низький середній
Смуги спектру	Вище, ширше	Нижчий, обмежений

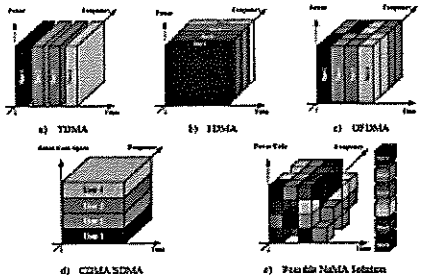


Рис.6. Застосування антенної системи MIMO

6 Архітектура базової мережі 5G

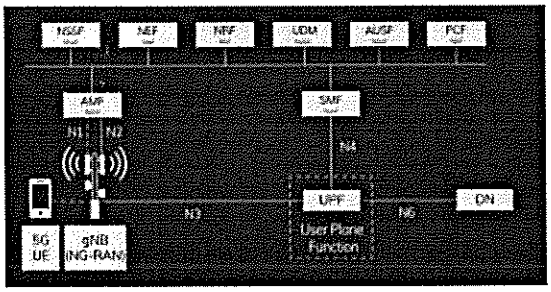


Рис.7. Архітектура базової мережі 5G

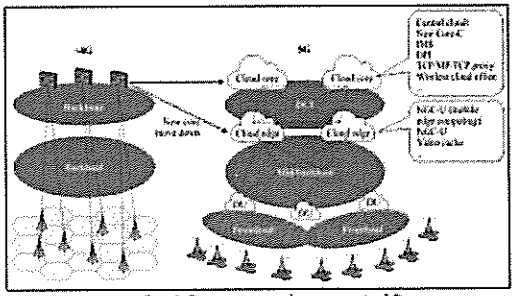


Рис.8. Розгортання ядра мережі у 5G

ОСНОВНІ ФУНКЦІЇ БАЗОВОЇ МЕРЕЖІ 5G:

Функція рівня користувача (UPF): *UPF виконує функції пересилання даних і маршрутизації пакетів у мережі 5G. Він відповідає за ефективну передачу пакетів даних користувача між обладнанням користувача (UE) і зовнішніми мережами або службами.*

Функція контрольної площини (CPF): *CPF керує функціями сигналізації та контролю в мережі 5G, включаючи керування мобільністю, встановлення сеансу та автентифікацію.*

Функція керування сеансами (SMF): *SMF відповідає за керування сеансами користувача і потоками даних у мережі 5G.*

Функція керування доступом і мобільністю (AMF): *AMF керує функціями доступу та мобільності, включаючи процедури реєстрації, автентифікації та передачі.*

Функція політики керування (PCF): *PCF відповідає за формування мережевих політик і надає програмне забезпечення (SLA) у мережі 5G.*

Функція сервера автентифікації (AUSF): *AUSF автентифікує користувачів і пристроїв, які намагаються доступ до мережі 5G, перевіряючи їхні особи на основі даних.*

Функція єдиних керування даними (UDM): *UDM керує ідентифікацією користувача та інформацією про підписку в мережі 5G.*

7 Особливості застосування міліметрового діапазону

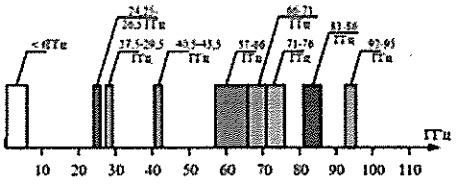


Рис.9. Найбільш поширені діапазони міліметрових хвиль.

Табл. 2.1. Хвилеводи призначені для використання в найбільш поширених міліметрових діапазонах

Значення	f_{crit} ГГц	Перетин a × b,мм	Робочий діапазон частот, ГГц
WR34	17,36	8,64×4,32	21,7-33,0
WR28	21,08	7,12×3,56	26,4-40,1
WR22	26,35	5,69×2,85	33,0-50,1
WR15	39,88	3,76×1,88	49,9-75,8
WR12	48,56	3,1×1,55	60,5-92,0
WR10	59,02	2,54×1,27	73,8-112

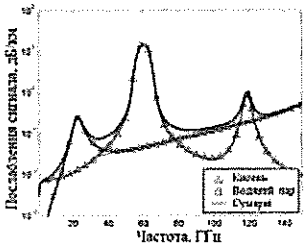


Рис 10. Величина загасання радіосигналу в каналі зв'язку, що викликане вітчим киснем та водяної пари

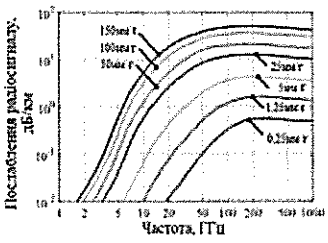


Рис.11. Ослаблення радіосигналу за різними рівнями інтенсивності опадів

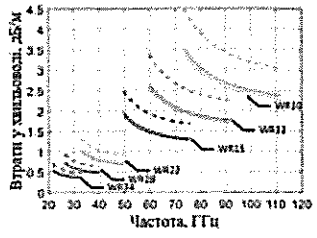


Рис.12. Втрати для хвилеводів

8 Модель каналу міліметрової хвилі

Табл.3. Моделювання каналу MmWave різними організаціями та зусиллями

Технологія	Частота	Модель каналу	Опис
5G	21 GHz, 38 GHz, and 73 GHz	3GCM	Багато вимірювань зроблено щодо моделювання каналів міліметрових хвиль, головним чином на частотах 28 ГГц, 38 ГГц і 73 ГГц. Спочатку пропозиція про вузькосмугові, а потім для широкосмугових каналів.
5G	10-100 ГГц	METIS	Модель каналу 5G PPP міліметрового діапазону для наземних систем. Модель включає моделювання каналів WINNER II і WINNER +
5G	10-100 ГГц	3GPP	Нова модель каналів серії 3GPP TR 38.900, що є розширеною 3GPP TR 36.873, здатний використовуватися для діапазонів вище 6 ГГц. Готова модель підтримує амплітудні та часові характеристики русла. Підтримуються різні сценарії та взаємодіяння 100 ГГц
5G	6-100 GHz	mmMAGIC	Ініціатива Європейської комісії щодо досліджень використання mmWaves для 5G. mmMAGIC створив модель каналу на основі інтенсивного моделювання та перевірки, використовуючи каналу кількість даних із 22 унікальні вимірювання каналів.

Табл.4. Моделі втрат у всенаправленому тракті в сценарії UMi

		Modelled Pathloss eq. [dB]	Applicability Range and Parameters
5GCM			
5GCM UMi Street Canyon LOS	$PL = 32.4 + 20\log_{10}(f_c[GHz]) + 20\log_{10}(d[m])$	$\sigma_{SF} = 4.1$ dB	$0.5 \le d_{2D} \le 1.0$ km
5GCM UMi Street Canyon NLOS	$PL = 32.4 + 30.7\log_{10}(f_c[GHz]) + 20\log_{10}(d[m])$	$\sigma_{SF} = 6.03$ dB	$0.5 \le d_{2D} \le 1.0$ km
5GCM UMi Open Space LOS	$PL = 32.4 + 19.2\log_{10}(f_c[GHz]) + 20\log_{10}(d[m])$	$\sigma_{SF} = 7.8$ dB	$0.5 \le d_{2D} \le 1.0$ km
5GCM UMi Open Space NLOS	$PL = 32.4 + 20.8\log_{10}(f_c[GHz]) + 20\log_{10}(d[m])$	$\sigma_{SF} = 7.1$ dB	$0.5 \le d_{2D} \le 1.0$ km
	$\Delta PL = 10\log_{10}(\cdot)$	$\sigma_{SF} = 7.0$	
METIS			
METIS UMi Street Canyon	$PL = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \le d_{2D} \le d_{BP} \\ PL_2 & d_{BP} \le d_{2D} \le 5\text{km} \end{cases}$ $PL_1 = 22\log_{10}(d_{3D}) + 28 + 20\log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 40\log_{10}(d_{3D}) + 28 + 20\log_{10}(f_c) - 9\log_{10}(d_{BP}^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$ $d_{BP} = 4h_{BS}h_{UT}f_c/c$	$\sigma_{SF} = 3.1$	$0.5 \le f_c \le 30$ GHz
METIS UMi Open Space	$PL = \min(PL_{LOS}, PL_{NLOS})$ $PL_{LOS} = 26\log_{10}(d_{3D}) + 22.8 + 20\log_{10}(f_c)$ $PL_{NLOS} = 36.7\log_{10}(d_{3D}) + 22.7 + 26\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 3.9$	$0.5 \le f_c \le 30$ GHz $10\text{m} < d_{2D} < 4\text{km}$ $1.5\text{m} \le h_{UT} \le 22.5\text{m}$ $h_{BS} = 35\text{m}$
mmMAGIC			
mmMAGIC UMi Street Canyon LOS	$PL = 32.4 + 21\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$	$\sigma_{SF} = 4.0$	$0.5 \le f_c \le 100$ GHz
mmMAGIC UMi Street Canyon NLOS	$PL = \max(PL_{LOS}, 35.3\log_{10}(d_{3D}) + 22.4 + 21.3\log_{10}(f_c) - 0.3(h_{UT} - 1.5))$	$\sigma_{SF} = 7.8$	$0.5 \le f_c \le 100$ GHz

Табл. 5. Моделі втрат у всенаправленому тракті в сценарії UMa

		Modelled Pathloss eq. [dB]	Applicability Range and Parameters
5GCM			
5GCM UMa LOS	$PL = 32.4 + 20\log_{10}(f_c[GHz]) + 20\log_{10}(d[m])$	$\sigma_{SF} = 4.1$	$0.5 \le f_c \le 100$ GHz
3GPP TR 36.873 UMa LOS	$PL = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \le d_{2D} \le d_{BP} \\ PL_2 & d_{BP} \le d_{2D} \le 5\text{km} \end{cases}$ $PL_1 = 28.0 + 22\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 28.0 + 40\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) - 9\log_{10}(d_{BP}^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$ $d_{BP} = 4h'_{BS}h'_{UT}f_c/c$, $h'_{BS} = h_{BS} - 1\text{m}$, $h'_{UT} = h_{UT} - 1\text{m}$	$\sigma_{SF} = 4.0$	$0.5 \le f_c \le 100$ GHz $10\text{m} < d_{2D} < 5000\text{m}$ $1.5\text{m} \le h_{UT} \le 22.5\text{m}$ $h_{BS} = 25\text{m}$
3GPP TR 36.873 UMa NLOS	$PL = \max(PL_{LOS}, PL'_{NLOS})$ $PL'_{NLOS} = 13.54 + 39.08\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) - 0.6(h_{UT} - 1.5)$ h_{UT} is the UT antenna height in meters NLOS	$\sigma_{SF} = 6.0$ $\sigma_{SF} = 7.8$	$0.5 \le f_c \le 100$ GHz $10\text{m} < d_{2D} < 5000\text{m}$ $1.5\text{m} \le h_{UT} \le 22.5\text{m}$ $h_{BS} = 25\text{m}$
METIS UMa LOS	$PL = \begin{cases} PL_1 & 10\text{m} \le d_{2D} \le d_{BP} \\ PL_2 & d_{BP} \le d_{2D} \le 5\text{km} \end{cases}$ $PL_1 = 28.0 + 22\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 28.0 + 40\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) - 9\log_{10}(d_{BP}^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$ $d_{BP} = 4h'_{BS}h'_{UT}f_c/c$, $h'_{BS} = h_{BS} - 1\text{m}$, $h'_{UT} = h_{UT} - 1\text{m}$	$\sigma_{SF} = 4.0$	$0.5 \le f_c \le 30$ GHz $10\text{m} < d_{2D} < 5000\text{m}$ $1.5\text{m} \le h_{UT} \le 22.5\text{m}$ $h_{BS} = 25\text{m}$
METIS UMa NLOS	$PL = \min(PL_{LOS}, PL'_{NLOS})$ $PL'_{NLOS} = 161.04 - 7.1\log_{10}(W) + 7.5\log_{10}(h)$ $-\left(24.37 - 3.7\left(\frac{h}{h_{BS}}\right)^2\right)\log_{10}(h_{BS})$ $+(43.42 - 3.1\log_{10}(h_{BS}))(\log_{10}(d_{3D}) - 3)$ $+20\log_{10}(f_c) - (3.2(\log_{10}(11.75h_{UT}))^2 - 4.97)$	$\sigma_{SF} = 6.0$	$0.5 \le f_c \le 6$ GHz $10\text{m} < d_{2D} < 5000\text{m}$ $1.5\text{m} \le h_{UT} \le 22.5\text{m}$ $h_{BS} = 25\text{m}$ $W = 20\text{m}$ $h = 20\text{m}$

9 Оцінка ефективності та порівняння продуктивності, результати моделювання

Табл.6. Параметри каналу та властивості антени для сценаріїв UMi та UMa

Параметри каналу	Специфікація	
	Сценарій UMi	Сценарій UMa
Несуча частота	28 GHz, 73 GHz	4 GHz
Пропускна здатність	800 MHz	360 MHz
Висота БС	Висота БС	Висота БС
Температура	30 °C	
Розділення TX-RX	10-500 m	
Кількість місць RX	500	
Ослаблення листя	0-4 dB/m x 10 m	
Висота у листі	10 m	
Потужність передачі	30 dBm	
Тип масиву TX, Nt	ULA, 16	ULA, 8
Тип масиву RX, Nr	ULA, 4	ULA, 2
Відстань між антенами TX	0.5 λ	
Відстань між антенами RX	0.5 λ	
Модуляція	OFDM	

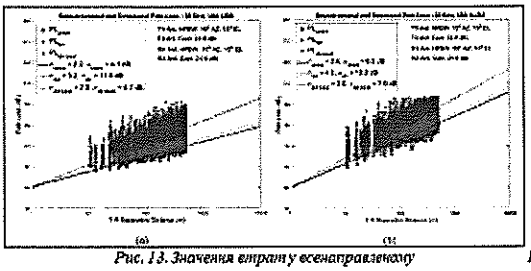


Рис. 13. Значення втрат у всенаправленому та спрямованому трактах

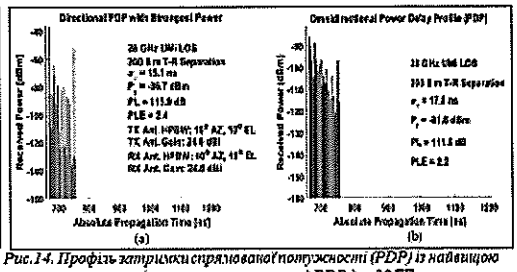


Рис.14. Профіль затримки спрямованої потужності (PDP) із найвищою потужністю та всенаправлений PDP для 28 ГГц

10 **Результати моделювання**

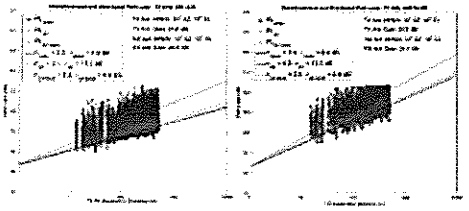


Рис. 15. Значення втрат на всенаправленому та спрямованому шляху, згенеровані за допомогою 500 прогонів моделювання для UMi 73 ГГц, (a) сценарій LOS та (b) NLOS

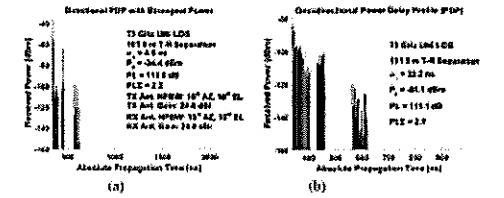


Рис. 16. Профілі всенаправленої PDP і спрямованої затримки живлення з найбільшою потужністю на частоті 73 ГГц у корпусі UMi LOS на відстані 101,9 м

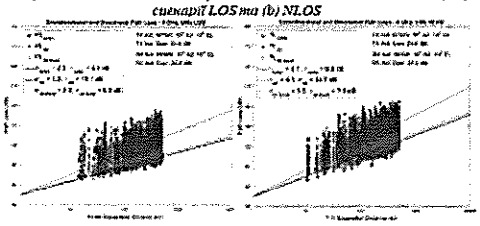


Рис. 17. Значення втрат у всенаправленому та спрямованому тракті, згенеровані за допомогою 500 прогонів моделювання для 4 ГГц UMa, (a) сценарій LOS та (b) NLOS.

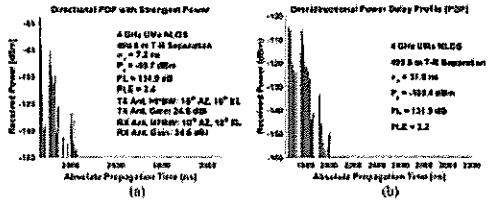


Рис. 18. Профілі всенаправленої PDP і спрямованої затримки потужності з найбільшою потужністю на частоті 4 ГГц на висоті 499,6 м UMa NLOS

11 **Висновки**

Таким чином, підсумовуючи вище сказане можливо зробити висновок:

- **Аналіз у першому розділі підтверджує**, що впровадження технології 5G стане важливим кроком для цифрового розвитку України та світу, забезпечуючи її конкурентоспроможність у світовій економіці.

Перспективи 5G включають розвиток IoT, телемедицини, розумних міст і автономного транспорту. Аналіз показав, що нашій країні для успішного впровадження технології слід звернути увагу на врегулювання частотного спектру, залучення інвестицій та підвищувати обізнаність населення.

- **У другому розділі досліджено** ключові технології, що забезпечують високі показники якості мереж 5G. Основна увага приділена архітектурі базової мережі 5G, яка базується на підході, орієнтованому на послуги, що забезпечує модульність, гнучкість і ефективність.

Особливу роль у впровадженні Інтернету речей відіграє зв'язок міліметрового діапазону (mmWave). Дослідження поширення мм-хвиль у щільному міському середовищі підтвердило їхню придатність для використання в гетерогенних мережах 5G. Результати свідчать про здатність mmWave забезпечувати масове підключення в густонаселених міських районах, долаючи обмеження, характерні для традиційних технологій.

- **Практичні дослідження підтвердили**, що міліметрові хвилі (mmWave) демонструють високу чутливість до блокування сигналу та атмосферних явищ, але мають значний потенціал у міських середовищах. Проаналізовано діапазони 28 ГГц, 73 ГГц і 4 ГГц; виявлено, що спрямовані антени з високим посиленням і технологія масивного MIMO здатні мінімізувати втрати сигналу, особливо в умовах NLOS(відсутність прямої видимості).

Це відкриває перспективи для підвищення ефективності мереж у щільно забудованих районах.

12

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ

ДОПОВІДЬ ЗАВЕРШЕНО

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Микита ВОВКОТРУБ

Назва: Метод впровадження технологій мобільного зв'язку п'ятого покоління на основі теорії поширення радіохвиль

Координатор: Наталія РУДЕНКО

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:5.4

Коефіцієнт подібності 2:3.7

Тривога: 6

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☐ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

....

Дата *Підпис Наукового керівника*