Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛАВРІНЕНКО ВЛАДИСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.396.94+004.72]:621.391.8(043.3)

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРИЙОМУ СИГНАЛУ В СЕНСОРНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ МІСТА ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ВІДБИТТЯ РАДІОХВИЛЬ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

172 Телекомунікації та радіотехніка

17 Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____Лавріненко В.С.

Науковий керівник (консультант) Степанов Михайло Миколайович, д.т.н., с. н. с.

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Лавріненко В.С. Підвищення якості прийому сигналу в сенсорних телекомунікаційних мережах міста шляхом використання відбиття радіохвиль міліметрового діапазону. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2024.

За матеріалами дисертації опубліковано: 7 робіт, з яких 3 – це статті у журналах, що входять до переліку фахових видань затверджених МОН України за спеціальністю дисертації або у періодичних виданнях іноземних держав, 4 - публікації у матеріалах конференцій, у тому числі, міжнародних.

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню актуальної науково- практичної задачі підвищення якості передачі сигналу міліметрового діапазону, його енергетики у складних умовах міста сенсорних мереж п’ятого покоління для поліпшення можливості мереж радіодоступу. Дисертаційна робота є вагомим внеском у вирішенні актуальних завдань оптимізації та підвищення продуктивності телекомунікаційних систем, зокрема бездротових сенсорних мереж.

Зміст дисертаційного дослідження викладено у трьох розділах, у кожному з яких представлено з поясненням основні результати дослідження:

У *вступі* виконано обґрунтування актуальності обраної теми дисертаційної роботи: пояснена важливість бездротових сенсорних мереж та окреслено складнощі, з котрими стикається та може зітнутися в майбутньому галузь Інформаційно-комунікаційних технологій. Із розвитком критично важливих IoT-сервісів та збільшенням обсягу даних зростає попит на пропускну здатність, технічні засоби та енергію, роблячи використання частотного ресурсу міліметрових хвиль ключовим для підвищення швидкості та якості бездротового зв’язку. Проте, міліметровий

діапазон зустрічає перешкоди у вигляді високого рівня затухання сигналів та чутливості до перешкод, особливо в міському середовищі з його високою густонаселеністю та численними об'єктами. Саме це обмежує дальність та надійність зв'язку. Використання штучних відбивачів, що дозволяють керувати дифракцією та відбиттям хвиль, стає стратегією для подолання цих обмежень, забезпечуючи поліпшення пропускної спроможності та дальності зв'язку. Ці технологічні новації відкривають дорогу для оптимізації міліметрових телекомунікаційних мереж, що є вирішальним для розширення бездротових мереж, включно з IoT-пристроями та сенсорними мережами, забезпечуючи стабільне покриття та високоякісний зв'язок у складних умовах міського середовища. Виходячи з цього сформульовано мету та визначено завдання дослідження, надано інформацію про наукову та практичну новизну роботи, апробацію основних результатів дослідження на науково-практичних конференціях та їх публікацію у формі статей у фахових виданнях.

У *першому* розділі на основі розгляду наукових джерел висвітлено різні аспекти телекомунікаційних технологій. Розглянуто поняття бездротових сенсорних мереж, їх роль та вплив у контексті зеленої комунікації, що є фундаментом для розуміння їх ролі та потенціалу в сучасному світі комунікацій. Пропонується огляд потрібних технологій, а також основних викликів, з якими стикаються мультимедійні бездротові сенсорні мережі, визначається широкий спектр застосувань даних мереж у різних секторах, окреслено практичну важливість. Також представлено основні характеристики сенсорних мереж та визначені вимоги до ефективності та надійності. У розділі детально аналізуються основні компоненти, включаючи види сенсорних вузлів, програмне забезпечення, розглядаються стандарти та технології, що стосуються транспортних протоколів для бездротових мереж, особливий акцент робиться на технологіях бездротової передачі даних, їх характеристиках та архітектурних особливостях. Завершуючи розділ, підбито висновки, які резюмують ключові аспекти, розкриті в контексті сучасних і прогресуючих сенсорних мереж.

У *другому розділі* розглянуто та проаналізовано ряд архітектурних моделей для сервісів Інтернету речей, включно з трирівневою, програмно-конфігурованою та восьмирівневою структурою спеціалізованою для 5G-IoT, що призначені для оптимізації та підвищення продуктивності IoT-мереж. На основі аналізу існуючих пропозицій стосовно архітектур, виділено та описано ключові рівні для ефективного функціонування розгортуваного сервісу. Розглядаються архітектури 5G New Radio, включаючи сценарії використання, варіативність у розгортанні мереж та властивості мережі радіодоступу. Заключна частина розділу – проаналізований розрахунок зони покриття для IoT-сервісів на основі 5G, виділяються ключові компоненти для роботи сервісу та конкретизуються теоретичні аспекти, що підкреслює вплив високої щільності під'єднаних пристроїв та розміщення базових станцій на комплексність та ресурсоємність мереж.

Третій розділ дослідження присвячений вирішенню окресленої науково-прикладної задачі за рахунок аналізу поширення хвиль міліметрового діапазону, увага приділяється питанням ліцензування та особливостям поширення радіохвиль міліметрового діапазону в різних умовах та сценаріях, зокрема міського середовища, описані деякі вже існуючі моделі каналів міліметрового діапазону хвиль. Також розглядається бюджет радіосистеми з врахуванням підсилення, акцент зроблено на аналізі дифракції, посиленні та загасанні сигналу міліметрового діапазону, розглядаються ефекти відбиття та розсіювання з метою створення моделі поширення та підсилення хвиль. Зокрема, пошук варіантів створення зон зі штучними відбивачами, що може покращити ефективність та розширити зону покриття мобільних систем міліметрового діапазону в міському середовищі без втручання на пряму в складні гетерогенні структури бездротових сенсорних та стільникових мереж.

Наукова новизна одержаних результатів при виконанні дисертаційної роботи полягає у наступному:

1. Отримали подальший розвиток теоретичних досліджень щодо використання стільникової мережі п'ятого покоління в сенсорних мережах, зокрема використання міліметрового діапазону 60-65 ГГц, для підвищення якості передачі сигналу,

розширення частотного ресурсу, підвищення пропускної здатності телекомунікаційних мереж.

2. Запропоновано застосування суперпозиції та відбиття для посилення сигналу в міліметровому E-діапазоні радіохвиль сенсорних мереж, які використовуються в мобільних системах міського середовища. Це дає можливість розширити зону покриття або зменшити енерговитрати у приймально-передавальних пристроях.

3. Вперше отримано модель радіоканалів, яка дозволяє моделювати проходження сигналів міліметрового діапазону 60-65 ГГц телекомунікаційних систем у місті з урахуванням відбиття. Також на основі моделі розроблено методику для покращення проходження сигналу і підвищення якості його прийому в телекомунікаційних системах міліметрового діапазону каналів 5G.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

На основі аналізу розповсюдження сигналів міліметрового діапазону в сенсорних мережах у складних умовах міста виявлено, що якість передачі сигналу може бути підвищена шляхом застосування рішень, які використовують суперпозицію та відбиття для посилення сигналу. В конкретних умовах міського середовища важливими є штучні відбивачі, які здатні посилити сигнал, тим самим теоретично розширити зону покриття та енергоефективність для критично важливих систем IoT, які розгортаються на базі сенсорних мереж.

Загалом, також можна констатувати важливість подальших досліджень та розробок у галузі з використанням міліметрового діапазону в телекомунікаційних системах, зокрема продовжувати вивчення особливостей поширення хвиль у цьому діапазоні, із використанням запропонованої моделі, щоб ефективно впроваджувати нові технології для забезпечення надійності та швидкості мобільного зв'язку.

Отримані в ході дисертаційних досліджень нові теоретичні та практичні результати були впроваджені в навчальний процес кафедри прикладної радіоелектроніки радіотехнічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», згідно з актом впровадження, під час підготовки лабораторних та практичних занять

з навчальної дисципліни [RE-200] «Мультимедійні технології в радіозв'язку» для студентів за спеціальністю 172 — «Електронні комунікації та радіотехніка».

Ключові слова: сенсор, безпроводова сенсорна мережа, мобільна бездротова сенсорна мережа, безпроводова мережа, енергоефективність, 5G, телекомунікаційна мережа, Інтернет речей, міліметрові хвилі, відбиття, радіозв'язок, безпровідний канал зв’язку, канал зв’язку, мережі зв'язку, математичне моделювання.

ABSTRACT

Lavrinenko V.S. Improving Signal Reception Quality in Urban Sensor Telecommunication Networks Through the Utilization of Millimeter-Wave Radio Wave Reflections. - The qualification scientific work presented as a manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of PhD in the field of knowledge 17 "Electronics and telecommunications" in the specialty 172 "Telecommunications and radio engineering". - National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine, National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine, Kyiv, 2024.

According to the materials of the PhD thesis published: 7 Papers, 3 of which are articles in journals included in the list of professional publications approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine in the specialty of the dissertation or in periodicals of foreign countries, 4 - publications in conference proceedings, including international.

The dissertation work is devoted to the solution of the actual scientific and practical problem of improving the quality of millimeter range signal transmission, and its energy in the complex conditions of the city of the fifth-generation sensor networks to improve the possibility of radio access networks. The dissertation is a significant contribution to the solution of current tasks of optimizing and increasing the productivity of telecommunication systems, in particular wireless sensor networks.

The content of the dissertation research is presented in three sections, in each of which the main research results are presented with an explanation:

The introduction substantiates the relevance of the chosen topic of the dissertation: the importance of wireless sensor networks is explained and the difficulties that the field of Information and Communication Technologies is facing and may face in the future are outlined. With the development of mission-critical IoT services and the increase in the amount of data, the demand for bandwidth, hardware, and energy is increasing, making the use of the millimeter wave frequency resource key to improving the speed and quality of wireless communication. However, the millimeter range faces obstacles in the form of a

high level of signal attenuation and sensitivity to interference, especially in an urban environment with its high population density and numerous objects. This is what limits the range and reliability of communication. The use of artificial reflectors to control the diffraction and reflection of waves is becoming a strategy to overcome these limitations, providing improved bandwidth and communication range. These technological innovations pave the way for the optimization of millimeter-scale telecommunication networks, which is crucial for the expansion of wireless networks, including IoT devices and sensor networks, ensuring stable coverage and high-quality communication in challenging urban environments. Based on this, the goal and tasks of the research were formulated, information was provided about the scientific and practical novelty of the work, the approval of the main results of the research at scientific and practical conferences, and their publication in the form of articles in professional publications.

The first chapter highlights various aspects of telecommunication technologies based on a review of scientific sources. The concept of wireless sensor networks, their role, and their influence in the context of green communication is considered, which is the foundation for understanding their role and potential in the modern world of communications. An overview of the necessary technologies is offered, as well as the main challenges faced by multimedia wireless sensor networks, a wide range of applications of these networks in various sectors is determined, and the practical importance is outlined. The main characteristics of sensor networks and the requirements for efficiency and reliability are also presented. The section analyzes in detail the main components, including types of sensor nodes, software, standards, and technologies related to transport protocols for wireless networks, with special emphasis on wireless data transmission technologies, their characteristics, and architectural features. At the end of the chapter, conclusions are drawn, which summarize the key aspects revealed in the context of modern and progressive sensor networks.

The second chapter reviews and analyzes several architectural models for IoT services, including a three-layer, software-configurable, and eight-layer structure specialized for 5G-IoT, designed to optimize and improve the performance of IoT networks. Based on the analysis of existing proposals regarding architectures, the key

levels for the effective functioning of the deployed service are highlighted and described. 5G New Radio architectures are reviewed, including usage scenarios, variability in network deployment, and radio access network properties. The final part of the chapter analyzes the calculation of the coverage area for IoT services based on 5G, highlights the key components for the operation of the service, and specifies the theoretical aspects, which emphasizes the impact of the high density of connected devices and the placement of base stations on the complexity and resource intensity of networks.

The third chapter of the study is dedicated to solving the outlined scientific and applied problem through the analysis of millimeter wave propagation, attention is paid to licensing issues and features of millimeter wave propagation in various conditions and scenarios, in particular the urban environment, some already existing models of millimeter wave channels are described. The budget of the radio system is also considered, taking into account amplification, the emphasis is placed on the analysis of diffraction, amplification, and attenuation of the millimeter range signal, and the effects of reflection and scattering are considered in order to create a model of propagation and amplification of waves. In particular, the search for options for creating zones with artificial reflectors, which can improve the efficiency and expand the coverage area of millimeter-range mobile systems in the urban environment without directly interfering with the complex heterogeneous structures of wireless sensor and cellular networks.

The scientific novelty of the results obtained during the dissertation work is as follows:

1. The further development of theoretical research on the use of the fifth generation cellular network in sensor networks, in particular the use of the millimeter range of 60-65 GHz, to improve the quality of signal transmission, expand the frequency resource, and increase the bandwidth of telecommunication networks, has been achieved.

2. The application of superposition and reflection to enhance signal strength in the millimeter-wave E-band range of radio waves in sensor networks used in urban mobile systems has been proposed. This allows for extending coverage areas or reducing energy consumption in transceiver devices.

3. For the first time, a radio channel model has been obtained that enables the modeling of signal propagation in the 60-65 GHz millimeter wave range of telecommunication systems in urban environments, taking into account reflection. Based on this model, a methodology has been developed to improve signal propagation and enhance its reception quality in 5G millimeter-wave channel telecommunication systems.

The practical importance of obtained results is as follows:

Based on the analysis of millimeter wave signal propagation in sensor networks in complex urban conditions, it has been found that signal transmission quality can be improved by implementing solutions that utilize superposition and reflection to enhance the signal. In specific urban environments, artificial reflectors are crucial as they can amplify the signal, theoretically extending coverage areas and energy efficiency for critical IoT systems deployed on sensor networks.

In general, it is also possible to state the importance of further research and development in the field using the millimeter range in telecommunication systems, in particular, to continue studying the characteristics of wave propagation in this range, using the proposed model, in order to effectively implement new technologies to ensure the reliability and speed of mobile communication.

The new theoretical and practical results obtained in the course of dissertation research were implemented in the educational process of the Department of Applied Radio Electronics of the RRadio engineering Faculty of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, in accordance with the act of implementation, during the preparation of laboratory and practical classes in the academic discipline [RE - 200] "Multimedia technologies in radio communication" for students majoring in 172 — "Electronic communications and radio engineering".

Key words: sensor, wireless sensor networks, mobile wireless sensor network, wireless network, energy efficiency, 5G, telecommunication network, Internet of Things, mmWave, reflection, radio communication, wireless communication channel, communication channel, communication networks, mathematical modeling.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Лавріненко В.С. Екологічні аспекти систем мобільного зв’язку 5G // *IV Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів та аспірантів «РАДІОЕЛЕКТРОНІКА В XXI СТОЛІТТІ»*- 25-26 травня 2021 р.: матеріали конференції - Київ, 2021. – С. 50-53.

2. Лавріненко В.С. An overview of necessary technologies for energy efficient and environmental multimedia 5G networks // *X Міжнародна науково-технічна конференція "Радіотехнічні проблеми, сигнали, апарати та системи" (РТПСАС-2021)* - 09-11 листопада 2021 р.: матеріали конференції - Київ, 2021. – С.78 -80.

3. Лавріненко В.С. An overview of the 5G NR architecture deployment scenarios // *XI Міжнародна науково-технічна конференція "Радіотехнічні проблеми, сигнали, апарати та системи" (РТПСАС-2022)* - 22-24 листопада 2022 р.: матеріали конференції - Київ, 2022. – С. 73-75.

4. Лавріненко В.С. Бездротові сенсорні мережі, основні поняття та сфери застосування// *V Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів та аспірантів «РАДІОЕЛЕКТРОНІКА В XXI СТОЛІТТІ»*- 10-12 травня 2023 р.: матеріали конференції - Київ, 2023. – С. 52-53.

5. Лавріненко В., Степанов М. Вибір технології зв’язку елементів сенсорної мережі. *Measuring and computing devices in technological processes.* 2023. № 3. С. 248–255. URL: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-30.

6. Лавріненко В., Степанов М. Зв’язок елементів сенсорної мережі системи моніторингу. *Measuring and computing devices in technological processes.* 2023. № 4. С. 199–201. URL: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-27.

7. Лавріненко В., Степанов М. Огляд компонентів для енергоефективних мультимедійних мереж на основі технологій радіодоступу 5G. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. № 1. С. 7–12. URL: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-1.

ЗМІСТ

ВСТУП 17
РОЗДІЛ 1 22
1. ОГЛЯД СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ. БЕЗДРОТОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ 22
1.1 Мультимедійні мережі в контексті зеленої комунікації, необхідні технології та виклики 22
1.2 Визначення бездротових сенсорних мереж 31
1.2.1 Важливість застосування WSN у різних сферах 32
1.2.2 Основні характеристики та вимоги до WSN 33
1.3 Основні компоненти бездротових сенсорних мереж 34
1.3.1 Види датчиків і технології 34
1.3.2 Програмне забезпечення (операційні системи та проміжне програмне забезпечення) 39
1.3.3 Стандарти транспортних протоколів. Технології бездротової передачі даних 42
1.3.3.1 Технології бездротової передачі даних в WSN 44
Висновки до розділу 1 67
РОЗДІЛ 2 69
2. АРХІТЕКТУРИ IOT ТА 5G NR 69
2.1 Архітектура IoT 70
2.1.1 Трирівнева архітектура 70
2.1.2 Архітектура на основі програмно-конфігурованої мережі 71
2.1.3 Восьмирівнева архітектура 5G-IoT 73
2.2 Архітектура 5G NR 77
2.2.1 Можливі сценарії використання 5G NR 78
2.2.2 Варіанти розгортання архітектури 5G NR 80
2.2.3 Опис NG RAN частини 83
2.3 Розрахунок зони покриття для IoT-сервісу на базі 5G NR 87

2.3.1 Опис системи моніторингу 87

2.3.2 Розрахунок зони покриття для системи моніторингу 92

Висновки до розділу 2 96

РОЗДІЛ 3 97

3-МІЛІМЕТРОВИЙ ДІАПАЗОН ХВИЛЬ У П'ЯТОМУ ПОКОЛІННІ КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ 97

3.1 Ліцензіювання міліметрового діапазону хвиль 98

3.2 Особливості поширення міліметрового діапазону хвиль 101

3.3 Підходи та методи для створення моделей каналів міліметрового діапазону хвиль 107

3.4 Бюджет радіосистеми з врахуванням підсилення, аналіз дифракції поля та шуму 113

3.4.1 Посилення та загасання сигналу міліметрового діапазону, пов'язані з явищами відбиття та дифракції 118

3.4.2 Розгляд дифракції міліметрових хвиль з використанням геометричної теорії дифракції 121

3.4.3 Дифракція, спричинена прямокутним провідним клином 124

3.4.4 Оцінка втрат і відбиття сигналу у міліметровому діапазоні при відбиваннях 126

3.4.4 Моделі каналів в міліметровому діапазоні з урахуванням ефектів розсіювання 130

3.4.5 Модель для аналізу посилення в радіоканалі міліметрового діапазону з використанням штучного відбиття 134

Висновки до розділу 3 140

ВИСНОВКИ 142

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 144

ДОДАТОК А 152

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС..... 152

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

5G – fifth generation;

ІКТ – інформаційно-комунікаційні технології;

ЕЕ – енергоефективність;

БС – базова станція;

IoT – Internet of Things;

QoE – quality of experience;

HetNet – heterogeneous network;

QoS – quality of service;

NOMA – Non-Orthogonal Multiple Access;

MIMO – multiple input, multiple output;

LAN – Local Area Network;

3G – third generation;

GSM – Global System for Mobile Communications;

GPRS – General Packet Radio Service;

4G – fourth generation;

LTE – Long-Term Evolution;

5G NR – 5G New Radio;

TDMA – Time Division Multiple Access;

MS – mobile station;

MT – mobile terminal;

UE – user equipment;

UMTS – Universal Mobile Telecommunications System;

UTRAN – Universal Mobile Telecommunications System;

IoE – Internet of everything;

MEC – Mobile Edge Computing;

MCC – Mobile Cloud Computing;

D2D – Device-to-Device;

NG-RAN – Next Generation Radio Access Network;

OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access;

mmWave – millimeter wave;

3GPP – 3rd Generation Partnership Project;

FCC – Federal Communications Commission;

CEPT – European Conference of Postal and Telecommunications Administrations;

ITU – International Telecommunication Union;

UMa – mrban macro;

UMi – mrban micro;

SMa – suburban macro;

LOS – Line of Sight;

NLOS – Non-Line of Sight.

ВСТУП

Актуальність теми. Мультимедійні системи активно впроваджуються в інформаційні технології та стають невід'ємною частиною суспільного життя. Зокрема, бездротові сенсорні мережі та сервіси Інтернету речей (англ. Internet of Things(IoT)) визначають новий рівень взаємодії з навколишнім середовищем. У світі високих технологій ці мережі стають ключовим інструментом для вирішення різноманітних завдань: починаючи від екологічного моніторингу до управління міською інфраструктурою та підвищення рівня безпеки.

Бездротові сенсорні мережі, які обмінюються даними між розподіленими сенсорами, виступають невидимим нервовим центром, що забезпечує взаємодію між пристроями та об'єктами оточуючого середовища. У цьому потоці інформації сенсори функціонують як чутливі рецептори, перетворюючи фізичні параметри на дані, зрозумілі для систем штучного інтелекту та програмного забезпечення високого рівня.

Зараз, коли вимоги до ефективності та безпеки надто високі, важливість бездротових сенсорних мереж лише зростає. Вони не лише автоматизують та оптимізують різні аспекти повсякденного життя, але й виступають технологічною основою для реалізації концепцій «Розумне місто», «Інтернет речей» та «Спрощений спосіб життя».

Важливо відзначити, що інформаційно-комунікаційна галузь (ІКТ) представляє собою енерговитратне середовище, адже мережі радіодоступу відповідають за 60% від обсягів енергоспоживання та забруднення, що припадають на ІКТ галузь. Із розвитком мереж та підключенням нових пристроїв зростає не лише кількість, але й якість послуг, таких як віддалений моніторинг, безпека дорожнього руху, управління в режимі реального часу та інші. У зв'язку з цим очікується експонентне зростання трафіку даних та розростання мережі.

З огляду на стрімке зростання чисельності сенсорних мереж та IoT-пристроїв питання підвищення ефективності бездротового зв’язку стає невід'ємною частиною мереж нового покоління та вимагає ефективного розподілу ресурсів та оптимального

планування мереж, зокрема використовуючи математичне моделювання каналу зв’язку з врахуванням особливостей середовища поширення.

Оскільки зі зростанням кількості даних зростає попит на швидкість, особливо для критично важливих IoT сервісів, це неминуче призводить до зростання попиту на смугу пропускання, кількість технічних засобів та споживану енергію. Тому розширення частотного ресурсу, зокрема використання частотного ресурсу міліметрових хвиль у бездротових мережах для досягнення високих швидкостей передачі даних, стабільності та якості послуг, є цілком логічним кроком.

Однак, ефективне використання міліметрового діапазону хвиль стикається з обмеженнями, такими як високий рівень затухання сигналу та чутливість до перешкод, що обмежує дальність та надійність зв'язку. Це особливо актуально у міських умовах, де густонаселеність та численні перешкоди створюють додаткові виклики для стабільного зв'язку. Враховуючи це, дані обмеження необхідно перетворити на перевагу, досліджуючи дифракцію та відбиття з метою створення штучних відбивачів та підсилення сигналу на противагу негативним аспектам. Дані відбивачі можуть бути стратегічно розміщені для покращення пропускної спроможності та дальності зв'язку в міліметровому діапазоні, забезпечуючи ефективне відбиття хвиль у зонах без прямої видимості.

Інтеграція штучних відбивачів у міліметрові мережі відкриває нові можливості для подолання основних викликів, пов'язаних з міліметровим E-діапазоном радіо хвиль та забезпечення високоякісного безперервного зв'язку. Це не тільки підвищить ефективність використання частотного ресурсу, але й дозволить масштабувати бездротові мережі, забезпечуючи стабільне покриття для зростаючої кількості IoT-пристроїв та сенсорних мереж у міському середовищі. Таким чином, інтеграція штучних відбивачів є ключовим елементом у стратегії розвитку та оптимізації міліметрових телекомунікаційних мереж, що дозволяє максимально реалізувати потенціал високошвидкісного зв'язку в умовах постійного зростання попиту на дані.

Наукова задача. Підвищити якість передачі сигналу міліметрового діапазону, його енергетики в складних умовах міста сенсорних мереж п’ятого покоління для поліпшення можливості мереж радіодоступу.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження особливостей поширення хвиль міліметрового діапазону з метою моделювання та покращення характеристик бездротового каналу зв'язку у сенсорних мережах на базі мереж радіодоступу 5G.

Для досягнення поставленої мети були сформовані наступні завдання:

- провести огляд архітектури та умов розгортання бездротових сенсорних мереж їх застосування та наявні перешкоди в розповсюдженні сигналу;
- провести аналіз технологій радіодоступу, щодо використання в бездротових сенсорних мережах;
- здійснити аналіз можливостей мереж 5G для розгортання систем IMM;
- проаналізувати можливості універсалізації архітектури IoT сервісу на базі мереж радіодоступу 5G NR;
- отримати характеристики сигналів для IMM в сенсорних мережах на базі мереж радіодоступу 5G NR;
- провести огляд особливостей поширення радіохвиль міліметрового діапазону в залежності від погодних умов та особливостей рельєфу поширення;
- створити математичну модель яка використовувала особливості суперпозиції та відбиття радіо хвиль міліметрового діапазону;
- запропонувати методику використання математичної моделі з ціллю застосування штучних відбивачів для підсилення сигналу в каналі зв’язку.

Об'єкт дослідження. Процес розповсюдження хвиль міліметрового діапазону в сенсорних мережах, стільникової мережі п’ятого покоління, підвищення енергоефективності в зоні покриття.

Предмет дослідження. Архітектура та технології передачі даних в бездротовому каналі стільникової мережі 5G, енергоефективність в зоні покриття станцій міліметрового діапазону.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Отримали подальший розвиток теоретичні дослідження щодо використання стільникової мережі п’ятого покоління в сенсорних мережах, зокрема використання міліметрового діапазону 60-65 ГГц, для підвищення якості передачі сигналу,

розширення частотного ресурсу, підвищення пропускної здатності телекомунікаційних мереж.

2. Запропоновано застосування суперпозиції та відбиття для посилення сигналу в міліметровому E-діапазоні радіохвиль сенсорних мереж, які використовуються в мобільних системах міського середовища. Це дає можливість розширити зону покриття або зменшити енерговитрати у приймально-передавальних пристроях.

3. Вперше отримано модель радіоканалів, яка дозволяє моделювати проходження сигналів міліметрового діапазону, 60-65 ГГц телекомунікаційних систем в місті з урахуванням відбиття. Також на основі моделі розроблено методику для покращення проходження сигналу і підвищення якості його прийому в телекомунікаційних системах міліметрового діапазону каналів 5G.

Практичне значення отриманих результатів.

На основі аналізу розповсюдження сигналів міліметрового діапазону в сенсорних мережах складних умов міста виявлено, що якість передачі сигналу може бути підвищена шляхом застосування рішень, які використовують суперпозицію та відбиття для посилення сигналу. В конкретних умовах міського середовища важливими є штучні відбивачі, які здатні посилити сигнал, тим самим теоретично розширити зону покриття та енергоефективність для критично важливих систем IoT, які розгортаються на базі сенсорних мереж.

Загалом, також можна констатувати важливість подальших досліджень та розробок у галузі з використанням міліметрового діапазону в телекомунікаційних системах, зокрема продовжувати вивчення особливостей поширення хвиль в цьому діапазоні, із використанням запропонованої моделі, щоб ефективно впроваджувати нові технології для забезпечення надійності та швидкості мобільного зв'язку.

Отримані в ході дисертаційних досліджень нові теоретичні та практичні результати були впроваджені в навчальний процес кафедри прикладної радіоелектроніки радіотехнічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», згідно з актом впровадження, під час підготовки лабораторних та практичних занять

з навчальної дисципліни [RE-200] «Мультимедійні технології в радіозв'язку» для студентів за спеціальністю 172 — «Електронні комунікації та радіотехніка».

Особистий внесок здобувача.

Результати теоретичних досліджень, експериментальних результатів математичних моделювань отримані автором самостійно. В роботах опублікованих, у співавторстві, здобувач відігрвав головну роль в постановці та вирішенні завдань, також узагальненні отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. За результатами дослідження опубліковано 7 наукових праць, у тому числі 3 статті в наукових фахових виданнях та 4 тезових доповіді в збірках матеріалів конференції.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційне дослідження складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (82 джерела). Викладена на 153 сторінках машинописного тексту, містить 13 таблиць, 49 рисунків.

РОЗДІЛ 1

1. ОГЛЯД СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ. БЕЗДРОТОВІ СЕНСОРНІ МЕРЕЖІ

1.1 Мультимедійні мережі в контексті зеленої комунікації, необхідні технології та виклики

Мультимедійні системи активно розвиваються в галузі інформаційних технологій та міцно увійшли в життя суспільства. Використання терміну мультимедійність означає, що інформація та дані в цілому, що були передані, складаються з одного або кількох компонентів, таких, як текстова, фото-, аудіо- або відеоінформація. Сама «мультимедіа» позначає комплексне маніпулювання принаймні деякою інформацією, представленою як безперервні медіадані, а також деякою інформацією, кодованою як окремі медіадані (наприклад, текстом та графікою). Під маніпуляцією мається на увазі захоплення, обробка, зв'язок, презентація та/або зберігання. Під безперервними медіаданими розуміють дані, що залежать від часу в мультимедійних системах (наприклад, аудіо- та відеодані), якими маніпулюють у чітко визначених частинах за часовий інтервал відповідно до встановлених норм. Отже, «мультимедійні комунікації» стосуються передачі, протоколів, послуг та механізмів для дискретних та безперервних носіїв у/над цифровими мережами. Але є важливе уточнення, що, наприклад, передача цифрового відео через певну виділену телевізійну мережу не є мультимедійними даними, якщо немає можливості додатково передавати певний тип дискретних медіаданих [1].

Для сучасного користувача передача мультимедійних даних та використання інформаційних технологій нерозривно пов’язана з бездротовими мережами доступу. Зокрема, стрімко збільшується частка мобільних мереж, мобільні мережі п’ятого покоління, відомі широкому загалу як 5G (англ. fifth generation) мережі, це наступний крок в розвитку інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ). Мережі 5G якісно виділяються на фоні попередніх поколінь, вони гарантують ультранадійний зв'язок із

низькою затримкою, забезпечують розширену мобільну широкосмугову мережу та зв'язок машинного типу. Системи зв'язку 5G спрямовані на постійне поліпшення «якості досвіду (вражень)» (англ. quality of experience, QoE), високу швидкість передачі даних для користувачів мобільних мереж та прагнуть до низького споживання енергії.

У цілому, галузь ІКТ досить енерговитратне середовище. За статистичними даними ця галузь відповідає за близько 2-10% від світового споживання енергії та за 2% від обсягу викидів CO_2. Важливим є те, що мережі на основі радіодоступу відповідають за 60% від наведених обсягів споживання та забруднення [2]. Мережа не стоїть на місці, постійно зростає, як живий організм. Підключаються інтелектуальні пристрої, та, зокрема, збільшується кількість користувачів-девайсів, які підключають авто, побутову техніку тощо. Зростає кількість та якість надаваних послуг у мережі, таких, як віддалений моніторинг, безпека дорожнього руху, управління в режимі реального часу, віртуальна, доповнена реальність та розвиток концепції Інтернету речей (англ. Internet of Things (IoT)) тощо [3].У зв’язку з цим очікується продовження експонентного зростання трафіку даних та розростання мережі.

Збільшення споживання енергії та зростання вуглецевого сліду від стільникових мереж призвели до постійних пропозицій «зелених» рішень від дослідників, урядів, та, зокрема, провайдерів телекомунікацій. На додаток до екологічної цінності мета енергоефективності також пов'язана зі зниженням експлуатаційних витрат операторів мобільних мереж та збільшення вдоволення користувачів за рахунок збільшення терміну служби акумулятора їх пристроїв. Таким чином питання енергоефективності невід’ємна частина мереж нового покоління. Для контролю за споживанням енергії визначено необхідність ефективного розподілу ресурсів, оптимальне планування мереж та використання відновлюваних джерел. Стоїть завдання зберегти споживання енергії на тому ж рівні, або навіть знизити на фоні зростаючого обсягу даних, що передаються, разом зі збільшенням кількості базових станцій (БС).

Коли говорять про енергоефективну мережу, то мається на увазі здатність технології радіоінтерфейсу мінімізувати споживання енергії мережею доступу відносно пропускної спроможності трафіку. Енергоефективний пристрій – це пристрій, котрий може мінімізувати потужність, котру споживає його модем, у залежності від конкретних особливостей трафіку. Таке ж визначення і для користувацького обладнання, яке має підтримувати швидкість передачі мобільних широкосмугових даних, одночасно зменшуючи споживання енергії. У цілому, пристрої мають відповідати вимогам, викладеним в ITU-R M.2410-0 (Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s))[4].

Мобільна мережа складається з базових станцій та точок доступу, що дозволяють мобільним терміналам взаємодіяти з ядром мережі. У мобільному зв'язку базові станції є основним джерелом енергоспоживання. Реалії сьогодення такі, що базові станції 5G New Radio споживають у три рази більше енергії, ніж базові станції того ж LTE та використовуються на 10% від своєї енергоефективності. Обговорюючи показники енергоефективності базових станцій використовують певну метрику. Найбільш часто використовуваною метрикою ефективності є біт/джоуль [5].

Одним із способів досягнення зменшення споживання є відключення компонентів БС, які не потрібні та не використовуються в даний період часу. Із точки зору використання апаратних ресурсів існує декілька парадигм, а саме – консолідація ресурсів, віртуалізація, вибіркове підключення та пропорційні обчислення [6]. Вони включають в себе наступне:

- консолідація ресурсів передбачає в собі перегрупування невикористаної потужності. У різні періоди часу інфраструктурні ресурси мережі завантажені по-різному, в залежності від конкретного трафіку. Таким чином усе обладнання, яке розраховане на пікові навантаження, може бути непотрібне в конкретний момент. Тому, наприклад, вимкнення слабко навантажених елементів системи та рівномірний перерозподіл їх завдань між іншими дає необхідний рівень продуктивності та зменшує споживання енергії. Тобто використовуються ті ресурси, які краще адаптовані до поточного типу трафіку;

- розподілені механізми вибіркового підключення дозволяють окремим компонентам на краю мережі простоювати якомога довше, залишаючись у режимі очікування, уникаючи підтримки завдань мережевого підключення в обстановці відкритості по відношенню до решти мережі;
- віртуалізація дозволяє ефективно працювати більш ніж одному сервісу в рамках одного фізичного середовища. Це ефективно, оскільки, до прикладу, один завантажений комп'ютер може споживати енергії менше, ніж кілька мало завантажених. Хоча в дослідженнях уточняється, що рішення для віртуалізації явно призначене для зменшення споживання енергії в мережі ще не з'явилося;
- парадигма пропорційних обчислень заснована на відповідності кількості виконаної роботи до кількості спожитої пристроєм енергії описана в [6] на основі [7]. Такі енергопропорційні пристрої в ідеалі не споживають енергії в режимі сну, майже не витрачають енергію, коли виконується дуже мало роботи і поступово збільшують споживання з ростом навантаження та задач. До прикладу, найгірший випадок – це енергоагностичні пристрої, котрі незалежно від об'єму роботи споживають максимум енергії у ввімкненому стані. У свою чергу, цілком енергозберігаючі пристрої використовують кількість енергії відповідно до навантаження. Між цими крайніми випадками існує безліч варіантів, таких як одноступеневі та багатоступеневі. Споживання енергії як функція використання наведено на рисунку 1.1, дані нормовані від 0 до 1[6].

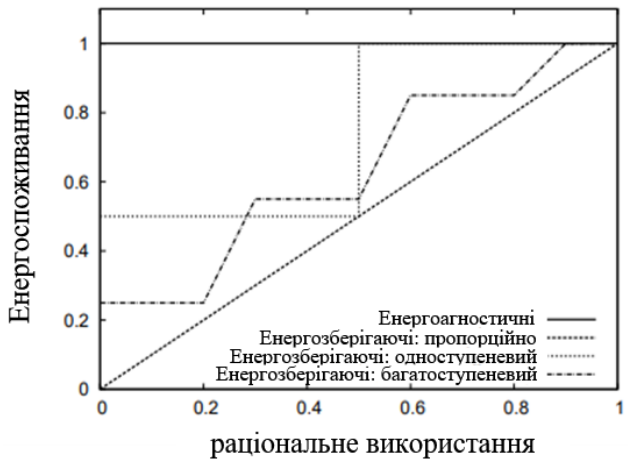


Рисунок 1.1. Споживання енергії як функція використання [6].

Екологічність технологій стала обов'язковою для бездротових мереж. Дослідники говорять про екологічну «зелену радіотехніку». Цей термін міцно ввійшов в академічні кола та промисловість як орієнтир в дослідженнях та розвитку бездротових мереж на шляху до високої енергоефективності[7]. Різні елементи бездротових мереж споживають різний відсоток енергії, на рисунку 1.2 наведено приклад енергоспоживання типової бездротової мережі. Об'єктивно видно, що необхідно підвищувати енергоефективність базових станцій (БС) та точок доступу.

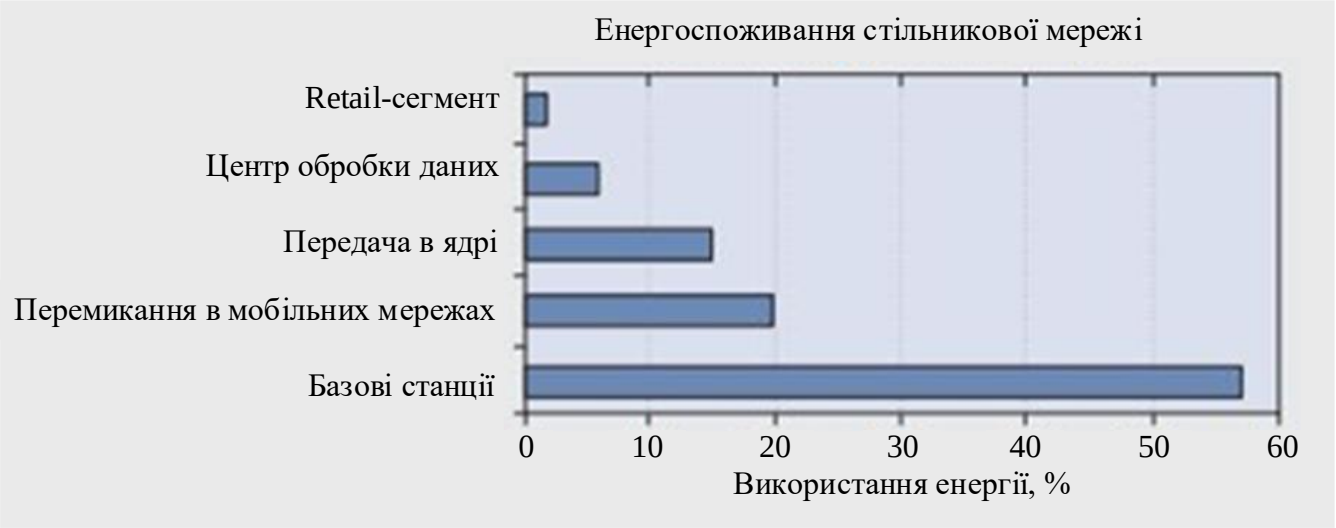


Рисунок 1.2. Споживання енергії типової бездротової стільникової мережі [7].

Надзвичайно важливо збільшувати відсоток енергоефективності у мережах з великою кількістю різнорідних БС без втрат у пропускній спроможності. Проводяться дослідження з метою балансу між енергетичною, спектральною ефективністю та стійкістю мережі 5G. З цієї точки зору було поставлено три цілі. По-перше, використати невикористаний спектр, зокрема неліцензований. По-друге, зменшити відстань між приймачем та передавачем та покращити повторне використання зайнятої частоти і, звичайно, підвищити спектральну ефективність, розгортаючи структури у великій кількості.

Щоб зменшити відстань між приймачем та передавачем пропонується використовувати так звані гетерогенні мережі (англ. Heterogeneous Network,

(HetNet)). Коли говорять про гетерогенну мережу у бездротовому зв’язку мають на увазі мережу, що використовує різні технології для підключення. Тобто гетерогенна мережа складається з підмереж із різними технологіями, при цьому всі вони утворюють єдине інтегроване середовище, де забезпечений безшовний непомітний для користувача перехід з однієї підмережі в іншу. Мережа доступу складається з макросоти та кількох дрібних сот, наприклад мікросоти, пікосоти, або ж фемптосоти. Мережа ж зворотного зв’язку формується шляхом підключення базової станції за допомогою змішаної архітектури, або ж дротовим чи бездротовим способом. Приклад гетерогенної мережі, наведено на рисунку 1.3 [8].

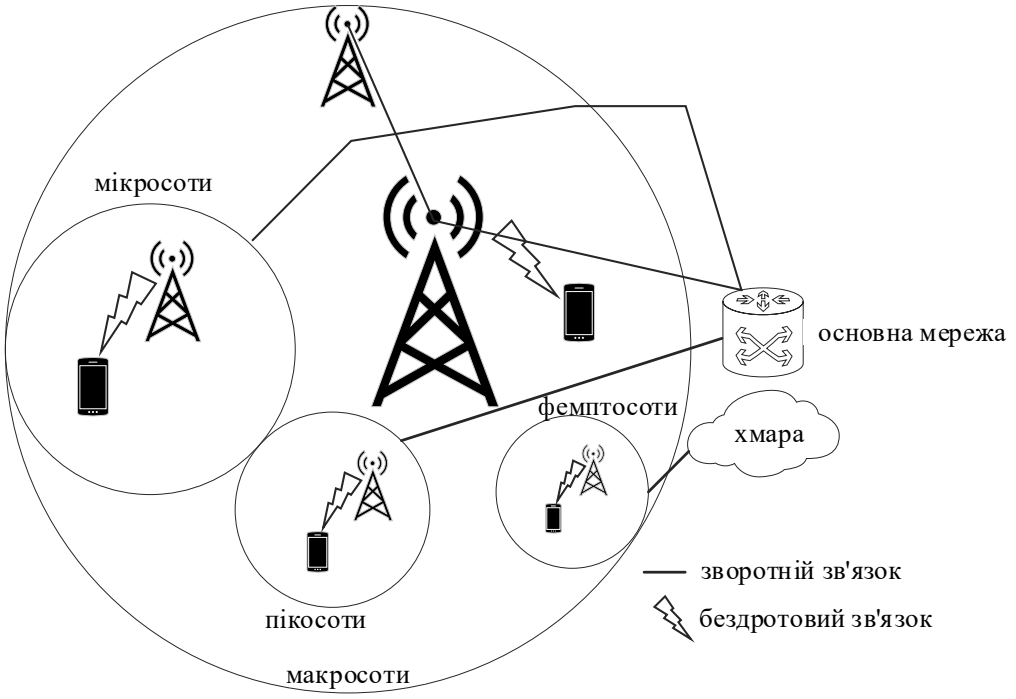


Рисунок 1.3. Архітектура мережі 5G HetNet [8].

Макросоти, хоча й керують потужними радіопроменями, але мають велику зону покриття, все ж інколи можуть накривати зони, фрагмети якої в більшості своїй можуть бути порожніми, тобто без користувачів. Таким чином потужність може бути надмірною та використовуватися марно. Фемптосоти ж забезпечую потужність там, де є необхідність. Тож, оскільки вони ближче до користувача, їм потрібна менша РЧ потужність для високої пропускної здатності. Фемтосота також пропонує на додачу

такі енергоефективні функції, як більш щільне покриття для користувачів, кращі можливості обслуговування (англ. Quality of Service, QoS) та триваліший час автономної роботи. Також важливо, що є можливість переводу дрібних сот в режим сну, при відсутньому навантаженні на мережу [9]. Можливо інтегрувати фемтосоти в макросоти, створюючи різні, необхідні комбінації, ефективніше плануючи мережу.

Таким чином змішані гетерогенні бездротові системи наближають кінцевих користувачів до доступу в мережу, завдяки чому покращується відношення сигнал/ шум, а також ефективніше повторно використовуються частоти [8].

Говорячи про переведення сот у режим сну, мається на увазі система, котра давно вже використовується в мобільних передавачах з метою збереження терміну служби акумулятора. Система переривчастої передачі (англ. discontinuous transmission (DT)) дає можливість передавати, лише коли виникає необхідність, в протилежному випадку передавач переходить у стан низького енерговикористання. Що ж до соти в цілому, то ця технологія називається вже DT соти (англ. cell DT) і базується на функції апаратного відключення для забезпечення низьких рівнів потужності. Існує два режими – це швидкісний (англ. fast-cell DT) і довгий (англ. long-cell DT). У випадку fast-cell DT радіоприймач у соті може перебувати в стані мікросну в проміжках часу, коли дані користувача не передаються. Long-cell DT працює повільніше і відноситься вже до режиму низької активності сот, такий стан можна вважати сотовим "сном" з більш низьким енерговикористанням [10].

Щоб досягти спектральної ефективності та кращого повторного використання частоти в гетерогенних мережах включається технологія неортогонального багаторазового доступу (англ. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)). У NOMA кілька користувачів можуть працювати в одному діапазоні одночасно, будучи розділеними за рівнями потужності. На передавачі використовується кодування суперпозиції таким чином, що приймач за допомогою блоку послідовного скасування перешкод (англ. successive interference cancellation (SIC)) може відділити користувачів, як у висхідній, так і низхідній лініях. У SIC декодування одночасно прийнятих пакетів досягається тим, що приймач декодує спочатку сильніший сигнал, віднімаючи його від комбінованого сигналу, а потім декодуючи різницю, як слабший

сигнал [11]. Таким чином включення NOMA в дрібні соти гетерогенних мереж, що використовують широковідому технологію множинного доступу (англ. Multiple Input Multiple Output (MIMO)) для обслуговування N-ої кількості користувачів, дає нам можливість ефективно використовувати ширину смуги та віднайти компроміс між пропускною здатністю та енергоефективністю [12].

Бездротові мережі почали застосовувати технологію MIMO з метою підвищення швидкості передачі даних, спектральної та енергоефективності. Для впровадження системи необхідно оснастити базові станції великою кількістю антен. Така система має значні переваги у порівнянні з системами, що базуються на підході "один вхід на один вихід"(англ. single-input single-output) (SISO)). Зокрема MIMO надає переваги в рознесенні та покращує надійність лінії зв’язку. Системи MIMO використовуючи мультиплексування, одночасно поєднують різних користувачів довкола однакового ресурсу передачі [10].

Також бездротові мережі нерозривно пов’язані з концепцією Інтернету речей, в котрому використовуються сенсори, зокрема для промислового Інтернету речей (англ. Indastrial Internet of Things(IIoT)). Датчики різного типу у поєднанні з бездротовим зв’язком утворюють так звану бездротову сенсорну мережу (англ. wireless sensor networks (WSNs)). Сьогодні мережі WSN є ядром мереж IoT і є основним джерелом споживання енергії. В IoT бездротова сенсорна мережа використовується для спостереження за об’єктами, моніторингу навколишнього середовища, виявлення загроз тощо. WSN складається з датчиків та базових станцій, датчики в свою чергу розподіляються автономно, контролюючи фізичні умови навколишнього середовища. Оскільки ця мережа буде лише розростатися, необхідно завчасно працювати у напрямку екологічних WSN, з метою покращення автономності та ефективного використання ресурсів [13]:

- вузли датчика мають працювати лише за необхідност;
- застосування бездротової зарядки, впровадження механізмів збору сонячної, кінетичної енергії, енергії вібрацій;

- використовувати методи оптимізації ЕЕ (контроль потужності передавача, оптимізація модуляції, кооперативний зв’язок, спрямовані антени, когнітивне радіо (англ. cognitive radio (CR));
- зменшувати обсяги необхідної пам’яті шляхом використання механізмів стиснення та кодування;
- застосовувати схеми маршрутизації для зменшення енергоспоживання.

Таким чином, оптимізуючи процеси сканування, обробку та з’єднання в мережі WSN можливо поступово перейти до зменшення необхідної енергії. Таку оптимізовану архітектуру можна розділити на три шари: шар сенсорів, шар шлюзів та шар управління.

Звичайно, кожна високопродуктивна мережа базується на центрах обробки даних. У цьому напрямку також ідуть шляхом покращень з метою зменшення викидів CO_2, оптимізації використання зеленої енергії, зменшення витрат на електроенергію. Для поліпшення ЕЕ в екологічному центрі обробки даних можна використовувати наступні методи [2]:

- використовувати відновлювані/зелені джерела енергії (вітер, вода, сонячна енергія, теплові насоси тощо);
- збільшення апаратного забезпечення, що працює в ЕЕ режимах;
- впровадження ЕЕ маршрутизації з метою використання доцільної кількості апаратних засобів;
- побудувати точні моделі живлення DC;
- встановлення чіткого взаємозв’язку центрів обробки та бездротової мереж з метою узгодження дій.

Розглянуті вище технології, системи та алгоритми приводять нас до розуміння розумної мережі та мережевих комунікації (англ. Smart grid and grid communications (SGGCs)), призначених для просування нових уявлень, що сприяють проектуванню комп’ютерних та комунікаційних систем. Такі системи, котрі керують великою кількістю датчиків, лічильників тощо, та накопичують великий об’єм даних з метою оптимізації та саморозвитку. Кілька екологічних взаємопов’язаних систем надають людям у всьому світі цінні послуги, такі як транспорт, охорона здоров’я, комунальні

послуги та ще безліч інших. Вони роблять їх більш якісними та енергоефективними[10].

Та все ж, описані вище технології можуть бути надто складними, або дороговартісними, та інколи недоступними для вже спроектованих та впроваджених систем, тому надзвичайно важливо шукати додаткові, сторонні або зовнішні способи покращення зв’язку та зменшення використання обмежених ресурсів та підвищення енергоефективності. Власне продовжувати досліджувати природу поширення радіохвиль, зокрема в міліметровому діапазоні, що використовується в мережах п’ятого покоління та на поточний момент часу вважається досить перспективним. При розробці систем зв’язку міліметрового діапазону хвиль, дослідники намагаються брати до уваги особливості дифракції та поглинання, що значно впливають на затухання сигналу. Врахування точних моделей поширення стає критичним для розробки нових протоколів сигналізації, особливо зважаючи на низькі затримки, які прогнозуються в телекомунікаційних мережах п’ятого покоління. Використання особливостей поширення хвиль в такому діапазоні може бути як і проблемою, так і особливістю, котру можна використати для покращення радіолінії.

1.2 Визначення бездротових сенсорних мереж

Бездротові сенсорні мережі забезпечують додаткові можливості для світосприйняття людини, слугуючи мостом між реальним, фізичним та віртуальним світами. Розгортаючи мережу, складену з великої кількості бездротових сенсорних вузлів можна збирати, обробляти та передавати інформацію до зовнішніх систем, що мають широкий спектр потенційних застосувань у промисловості, науці, транспорті, цивільній інфраструктурі, безпеці, тощо [14].

В Оксфордському словнику визначення «сенсор» тлумачиться як пристрій, який виявляє, вимірює фізичні властивості, або зміни та надає відповідний результат, або вимірювання у відповідь [15]. Сенсорний вузол може складатися з обчислювальних засобів (мікроконтролерів, центральних процесорів або процесорів

цифрової обробки сигналів), включати декілька видів пам’яті, передавач, джерело живлення, різні сенсори з аналого-цифровими перетворювачами та акутатори. Мережа, складена з сенсорних вузлів, розгорнутих у великій кількості, являє собою високо розподілену мережу для моніторингу середовища або систем. Такі мережі можуть зондувати, обробляти та передавати/приймати дані [14].

У свою чергу бездротова сенсорна мережа (WSN) – це група просторово рознесених сенсорних вузлів, які з’єднані між собою за допомогою бездротового зв’язку [16].

1.2.1 Важливість застосування WSN у різних сферах

Сенсорні мережі широко використовуються у різних сферах, в цілому загальні області використання такі:

- спостереження за навколишнім середовищем. Сенсорні мережі можуть використовуватися для відстеження змін у визначеному середовищу, до прикладу, моніторинг забруднення води, повітря, контроль лісових пожеж, або рівня зволоженості ґрунтів у сільськогосподарських угіддях, що дає можливість вжити відповідних заходів [14];
- використання для моніторингу явищ у міському середовищі. Найпопулярніші застосування бездротових сенсорних мереж у міському середовищі пов'язані з концепціями «розумних будинків», «розумних міст», системами транспорту та моніторинг стану будівель та інфраструктурних споруд [16];
- спостереження в сфері охорони здоров’я. У галузі медицини бездротові сенсорні мережі використовують передові медичні датчики для нагляду за пацієнтами в медичних закладах, лікарнях або вдома, а також для контролю над життєво важливими функціями пацієнта в реальному часі з використанням портативного обладнання[16];
- військове застосування. Військові використовують сенсорні мережі для нагляду. За їх допомогою можна контролювати рух транспорту, визначати місцезнаходження ворога та забезпечувати безпеку обладнання [14] ;

- використання у промисловості. Сенсорні мережі можуть бути використані в різних індустріальних контекстах для вирішення різноманітних взаємопов'язаних завдань. Основні підкатегорії промислового використання сенсорних мереж включають логістику, робототехніку та моніторинг стану обладнання [16].

Виходячи зі специфічних вимог промислового виробництва, програми WSN можна класифікувати на три групи [14]:

- Зондування навколишнього середовища.
- Моніторинг стану.
- Автоматизація процесів.

1.2.2 Основні характеристики та вимоги до WSN

До бездротових сенсорних мереж, висуваються певні ключові вимоги [14]:

- енергоефективність;
- простота в експлуатації;
- масштабованість;
- висока чутливість;
- розширений діапазон покриття;
- здатність до двостороннього зв'язку;
- компактний форм-фактор модуля;
- мобільність;
- можливість застосовувати в складних умовах, таких як річки, автостради та старі будівлі;
- відсутність небезпечних матеріалів;
- мають швидко встановлюватися та не залежати від обмежень на проведення певних робіт, наприклад отримання дозволу на проведення земельних робіт;
- підвищена надійність;
- довгострокова економія (не потребує повторної прокладки кабелю).

1.3 Основні компоненти бездротових сенсорних мереж

До основних компонентів бездротових сенсорних мереж можна віднести:

- сенсорні вузли.
- бездротовий зв'язок.
- центральний контролер або координаційна система.

Розвиток сенсорних мереж базується на досягненнях у сенсорних технологіях, комунікаціях та обчислювальній техніці [17].

1.3.1 Види датчиків і технології

Сенсорна мережа складається з великої кількості щільно розташованих сенсорних вузлів. Сенсори можуть бути розташовані в абсолютно різних місцях, до прикладу на відкритому просторі, на полі бою перед або за лінією фронту, всередині промислових машин, на дні водойми, на місцях біологічного чи хімічного забруднення, в комерційних будівлях, у житлових приміщеннях або навіть на чи в тілі людини. Сенсорний вузол зазвичай має вбудовані можливості обробки даних та внутрішню пам'ять; вузол може включати один або кілька сенсорів, що функціонують у різних діапазонах, таких як акустичний, сейсмічний, радіо (радарний), інфрачервоний, оптичний, магнітний, хімічний або біологічний. Вузол також оснащений комунікаційними інтерфейсами, які зазвичай включають бездротові канали зв'язку з сусідніми областями чи мережами. Зазвичай, сенсорний вузол має дані про своє місцезнаходження та позиціонування, отримані за допомогою глобальної системи позиціонування (GPS) або локальних алгоритмів позиціонування. (Але деякі дослідники зауважують, що використання механізмів на основі GPS іноді може бути дорогим або неефективним.) Спеціальна зона, в котрій розташовані сенсорні вузли, називається сенсорним полем. Кожен з розгорнутих вузлів може зібрати дані, проаналізувати їх і відправити до визначеного приймача. Рисунок 1.4 ілюструє типове розташування бездротової мережі сенсорів. Незважаючи на те, що в

багатьох випадках припускається, що всі сенсорні вузли мають однакові можливості, іноді зустрічаються гетерогенні середовища стосовно функціональності датчиків[17].

Для бездротових сенсорних мереж, надзвичайно важливі умови експлуатації, розташування, тип датчика, його обчислювальні/вимірювальні можливості, енергоефективність, обробка сигналів, зв'язок, телеметрія. Важливо відзначити в цьому контексті, що місце розташування вузла та точний час є критичними для належної роботи сенсорної мережі. Це практично протилежно поширеній архітектурі Інтернету, де місце розташування сервера не завжди має значення, і де затримка часто не є ключовим фактором або явним цільовим завданням рішення. У сенсорних мережах необхідні точна синхронізація часу та локалізація для виявлення подій, що цікавлять в конкретному спостережуваному середовищі. Місце розташування слід відстежувати як у локальному тривимірному просторі, так і в додаткових площинах, оцінювати рівні виявлення через пов’язаний набір (матрицю) датчиків (наприклад, який напрямок вітру, що містить забруднені частки). Локалізація використовується для таких функцій, як формування променю для локалізації цілі та подій, географічної переадресації та географічної адресації [17].

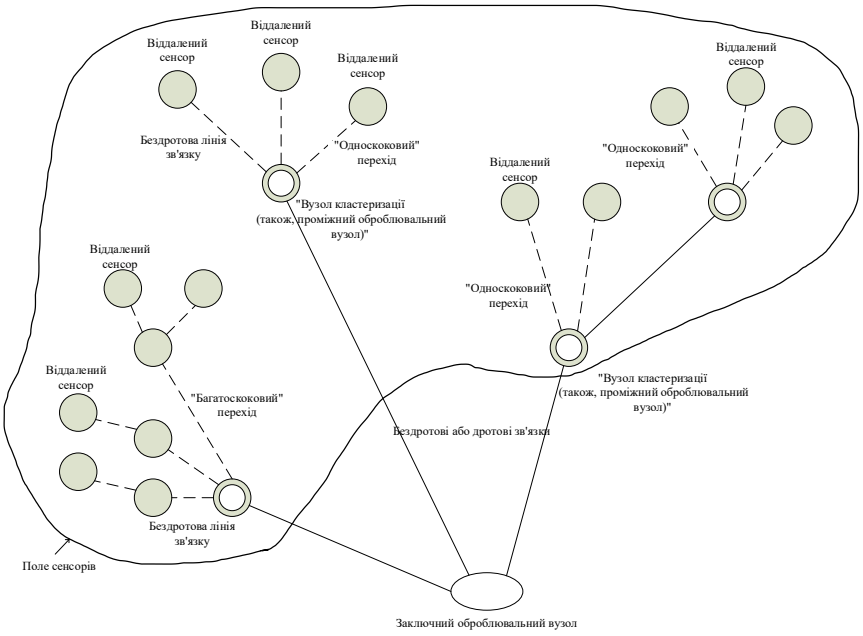


Рисунок 1.4. Типове розгортання сенсорної мережі.

Вбудовані сенсорні мережі складаються з трьох основних компонентів: вбудовування, мережевого зв'язку та сенсорів. Вбудовування передбачає інтеграцію великої кількості розподілених пристроїв для моніторингу фізичного оточення та взаємодії з ним. Ці пристрої є незалежними вузлами компактного розміру, оснащеними підсистемами управління та зв'язку. Для вбудованих систем характерне густе просторово-часове розташування. Мережа включає в себе концепцію фізичного та логічного зв'язку [17]. Метою логічного зв’язку є підтримка координації та інших завдань високого рівня; фізичне підключення зазвичай підтримується через бездротовий радіозв'язок.

Сенсорний мережевий простір передбачає наявність можливостей для вимірювання параметрів фізичного світу в тісно зв’язаному середовищі. Деякі характерні риси сенсорних мереж включають наступне:

- сенсорні вузли розташовані щільно;
- сенсорні вузли схильні до поломок;
- топологія сенсорної мережі змінюється дуже часто. Сенсорні вузли обмежені в потужності, обчислювальних можливостях і пам'яті;
- вузли датчиків можуть не мати глобальної ідентифікації через велику кількість накладних витрат і велику кількість датчиків;

Для сенсорних мереж важливі сенсорні вузли, які мають довгий термін служби та стійкість до впливу навколишнього середовища. Розповсюдженим є застосування систем, які функціонують автономно, без потреби нагляду чи прив'язки, і мають власне живлення зі зниженим циклом навантаження [17].

Ефективне використання електроенергії часто є ключовою задачею, яка має бути врахована при проектуванні. У більшості випадків засоби для передачі сигналів та антени є основними компонентами, які споживають більшість енергії. Сенсори можуть бути пасивними або активними. Пасивні включають сейсмічні, акустичні, деформаційні, вологості та температурні датчики. До пасивних належать масиви, що включають оптичні сенсори (видимого, інфрачервоного 1 мікрон (мм), інфрачервоного 10 мм) та біохімічні. Пасивні сенсори зазвичай мають низьке споживання енергії. До активних належать радар і гідролокатор. Ці системи, як

правило, потребують більше енергії. Тенденція розвитку націлена на дуже великі інтегральні схеми (англ. Very Large Scale Integration(VLSI)), інтегровану оптоелектроніку та нанотехнології; у цей час інтенсивно ведеться робота в біохімічній сфері. До складових елементів вузла (віддаленого) зондування входять (рис. 1.5.) наступні компоненти:

- сенсор та акутатор (як єдиний елемент або масив);
- обчислювальний пристрій;
- пристрої зв’язку;
- блок живлення;
- інші елемент в залежності від сфери застосування.

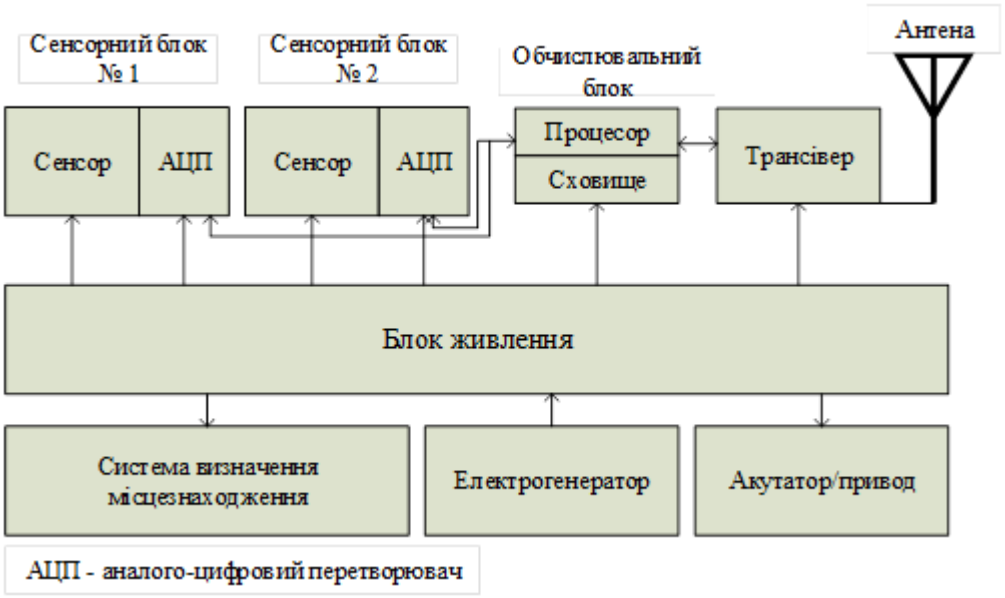


Рисунок 1.5. Типовий сенсорний вузол.

Крім вбудованого зондування, розробляють, впроваджують та керують наглядовими або безпровідними вбудованими системами управління та впливу. Такі системи називають контрольними мережами. Ця система контролю діє на навколишнє середовище або автономно, або під телеметрією віддаленого або централізованого вузла. Основні застосування вимагають більше, ніж просто зондування: вони потребують управління та впливу. Термін "спрацьовування"

відноситься до дій, які відбуваються за межами самого датчика (відкривання клапана, вилив рідини в навколишнє середовище, запуск двигуна для переміщення в інше місце). Задачі, які потребують керування або активності, охоплюють транспорт, високотехнологічне сільське господарство, медичний моніторинг, доставку медикаментів, втручання на полі бою та інше. Поза стандартними вимогами, такими як надійність та захищеність, системи управління також повинні враховувати аспекти безпеки [17].

Усі вище описані категорії проблем, пов’язаних із датчиками та їхньою комунікаційною/обчислювальною архітектурою зведено до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Категорія проблем, пов’язаних із датчиками та їхньою комунікаційною/обчислювальною архітектурою.

Сенсори	*Розмір:* Малі [наприклад, нанорозмірні електромеханічні системи (MEMS)], середні [наприклад, мікромасштабні електромеханічні системи (MEMS)] і великі (наприклад, радари, супутники): від кубічних сантиметрів до кубічних дециметрів. *Мобільність:* стаціонарні (наприклад, сейсмічні датчики), мобільні (наприклад, на роботизованих авто). *Тип:* пасивний (наприклад, акустичний, сейсмічний, відео, інфрачервоний, магнітний) або активний (наприклад, радар, лідар).
Робоче середовище	*Вимоги до моніторингу:* розподілений (наприклад, моніторинг навколишнього середовища) або локалізований (наприклад, відстеження цілі). *Кількість сайтів:* іноді невелика, але зазвичай велика (особливо для C1WSN). *Просторове покриття*: щільне, розріджене: C1WSN: низький діапазон з кількома стрибками або C2WSN: низький діапазон з одним стрибком (точка-точка).

Продовження таблиці 1.1.

Робоче середовище	*Розгортання:* фіксоване та планове (наприклад, заводські мережі) або спеціальне (наприклад, повітряне десантування) *Середовище:* сприятливе (завод) або несприятливе (поле бою). *Характер:* кооперативний (наприклад, управління повітряним рухом) або некооперативний (наприклад, військові цілі) *Склад:* однорідний (одні типи сенсорів) або неоднорідний (різні типи сенсорів) *Доступність енергії:* обмежена (наприклад, у маленьких сенсорах) або необмежена (наприклад, у великих сенсорах)
Зв'язок	*Мережа:* кабельна (інколи) або бездротова (частіше) *Пропускна здатність:* висока (інколи) або низька (частіше)
Архітектура обробки	*Централізована* (усі дані надсилаються на централізований сервер), *розподілена* (децентралізована) або *в мережі* (розташований на сенсорі чи на інших елементах мережі) або *гібридна*.

1.3.2 Програмне забезпечення (операційні системи та проміжне програмне забезпечення)

Для забезпечення функціонування вузла має велике значення використання відкритих операційних систем, спеціально розроблених для сенсорних мереж. Операційні системи для бездротових сенсорних мереж повинні бути спроектовані з урахуванням особливостей цих мереж, таких як обмежені ресурси, енергоефективність та високий рівень розподіленості. У таких операційних системах

зазвичай застосовується компонентна архітектура, яка дозволяє швидко впроваджувати нововведення та інновації, водночас зменшуючи обсяг коду з урахуванням обмежень пам'яті, які є характерними для сенсорних мереж.

TinyOS є прикладом такої популярної стандартної системи. TinyOS — це операційна система з відкритим кодом і ліцензією BSD, розроблена для малопотужних бездротових пристроїв, таких як ті, які зазвичай використовуються в бездротових вбудованих платформах [18]. У бібліотеці компонентів TinyOS включено мережеві протоколи, розподілені сервіси, драйвери датчиків та інструменти збору даних, які можна використовувати без змін або настроювати для певних завдань. Модель подійного керування TinyOS забезпечує точне управління енергією і гнучке планування, що є необхідним у зв'язку з непередбачуваною природою бездротового зв'язку та взаємодії з фізичним середовищем. Застосування TinyOS вже розширено на декілька платформ сенсорних пристроїв. Розробницька спільнота використовує TinyOS для моделювання, розробки та тестування різноманітних алгоритмів і протоколів, а різні групи активно співпрацюють у створенні стандартних мережевих сервісів [17].

Contiki-NG – це операційна система для пристроїв з обмеженими ресурсами, наприклад в сфері Інтернету речей. Contiki-NG включає RFC-сумісний стек комунікації IPv6 з низькою споживаною потужністю, що дозволяє забезпечити Інтернет-підключення. Система працює на різних платформах, що базуються на енергоефективних архітектурах, таких як ARM Cortex-M3/M4 та Texas Instruments MSP430. Розмір коду становить близько 100 (кБ), а використання пам'яті може бути налаштовано як менше 10 (кБ). Вихідний код доступний як відкритий, з ліцензією 3-Clause BSD [19]. Отже, з особливостей виділяють легкість та енергоефективність, також те, що підтримує IPv6 і використовується в різних бездротових пристроях.

RIOT OS – це операційна система відкритого коду для IoT. Вона призначена для використання на пристроях з обмеженими ресурсами, таких як мікроконтролери з низьким обсягом пам'яті та енергоефективними архітектурами. Основні особливості RIOT OS включають ефективність ресурсів, широкий спектр підтримуваних пристроїв, вбудовані мережеві протоколи (IPv6, 6LoWPAN, CoAP, MQTT), модульну

архітектуру для легкості розширення та модифікацій, а також відкритий вихідний код, що поширюється під ліцензією LGPLv2.1. RIOT OS активно використовується та підтримується спільнотою розробників у різних сферах, таких як автомобільна промисловість та медичні пристрої [20].

FreeRTOS є вільною операційною системою реального часу, спеціально розробленою для вбудованих систем та пристроїв Інтернету речей. За даними з офіційного веб-сайту, ця операційна система забезпечує ефективність ресурсів на обмежених пристроях, таких як мікроконтролери та мікропроцесори. Основною функціональністю FreeRTOS є підтримка реального часу та планування задач, що робить його надзвичайно корисним у сферах, де критично важливий час виконання. Широка підтримка спільноти розробників та активний розвиток системи роблять FreeRTOS досить популярним у вбудованих системах. Операційна система може легко портуватися на різні архітектури та платформи, що надає йому гнучкість для використання в різних вбудованих системах. Крім того, FreeRTOS розповсюджується під ліцензією Open Source MIT, що дає можливість використовувати, змінювати та розповсюджувати його вихідний код. Застосування FreeRTOS охоплює різноманітні сфери, включаючи автомобільну промисловість, медичні пристрої, електроніку споживчого вжитку та інші області, де вимагається ефективна операційна система реального часу для вбудованих пристроїв [21].

NuttX – це вбудована операційна система реального часу, гнучка та високо портативна, для різних архітектур та пристроїв. Розроблена як операційна система для вбудованих пристроїв, NuttX включає в себе ряд ключових функцій.

Однією з головних переваг NuttX є його висока портативність, що дозволяє легко переносити систему на різні архітектури та платформи. Це робить NuttX універсальним використанням у різноманітних вбудованих системах. Модульна архітектура системи дає розробникам можливість легко додавати та видаляти функціональність у залежності від конкретних вимог проекту. Ця гнучкість робить NuttX привабливим вибором для проектів різної складності та специфікацій. Призначена для роботи на пристроях з обмеженими ресурсами, NuttX забезпечує ефективне використання пам'яті та має низьке споживання енергії. Це важливо для

вбудованих систем, де ресурси можуть бути обмеженими. Надаючи можливості для реального часу та планування задач, NuttX відповідає вимогам вбудованих систем, де час виконання має вирішальне значення. NuttX є проектом з відкритим кодом і розповсюджується під ліцензією BSD, що надає свободу використовувати та модифікувати його вихідний код. Застосування NuttX охоплює різні області вбудованих систем, включаючи автомобільну електроніку, медичні пристрої, аудіо- та відеоапаратуру та інші сфери, де важлива операційна система реального часу з гнучкістю та високою портативністю [22].

1.3.3 Стандарти транспортних протоколів. Технології бездротової передачі даних

Інженери, що працюють над розвитком бездротових сенсорних мереж мають за мету розробити економічно ефективне мережеве рішення, яке базується на стандартах. Це рішення має підтримувати низькі та середні швидкості передачі даних, забезпечувати ефективне використання енергії та гарантувати безпеку та надійність. Розміщення сенсорних вузлів не має бути заздалегідь визначеним, що дає можливість для вільного розгортання в умовах важкодоступних локацій або динамічних ситуацій. Однак це також означає, що протоколи та алгоритми сенсорної мережі повинні бути здатні до самоорганізації. В контексті військових або національно-безпекових застосувань сенсорні пристрої мають бути готовими до швидкого впровадження, з можливістю спеціального режиму розгортання і врахуванням високо динамічного оточення [17].

Дослідники розробили багато нових протоколів спеціально для WSN, де урахування енергетичних аспектів є ключовим чинником. Значну увагу було приділено протоколам маршрутизації, оскільки вони можуть відрізнятися від традиційних мереж у залежності від конкретних програм та архітектури мережі. Сама мережа є основним архітектурним компонентом сенсорних мереж і стандарти відіграють важливу роль в цьому контексті. Загальна модель стеку протоколів, що

може бути використана для опису комунікаційного пристрою, представлена на рисунку 1.6. (табл. 1.2.).

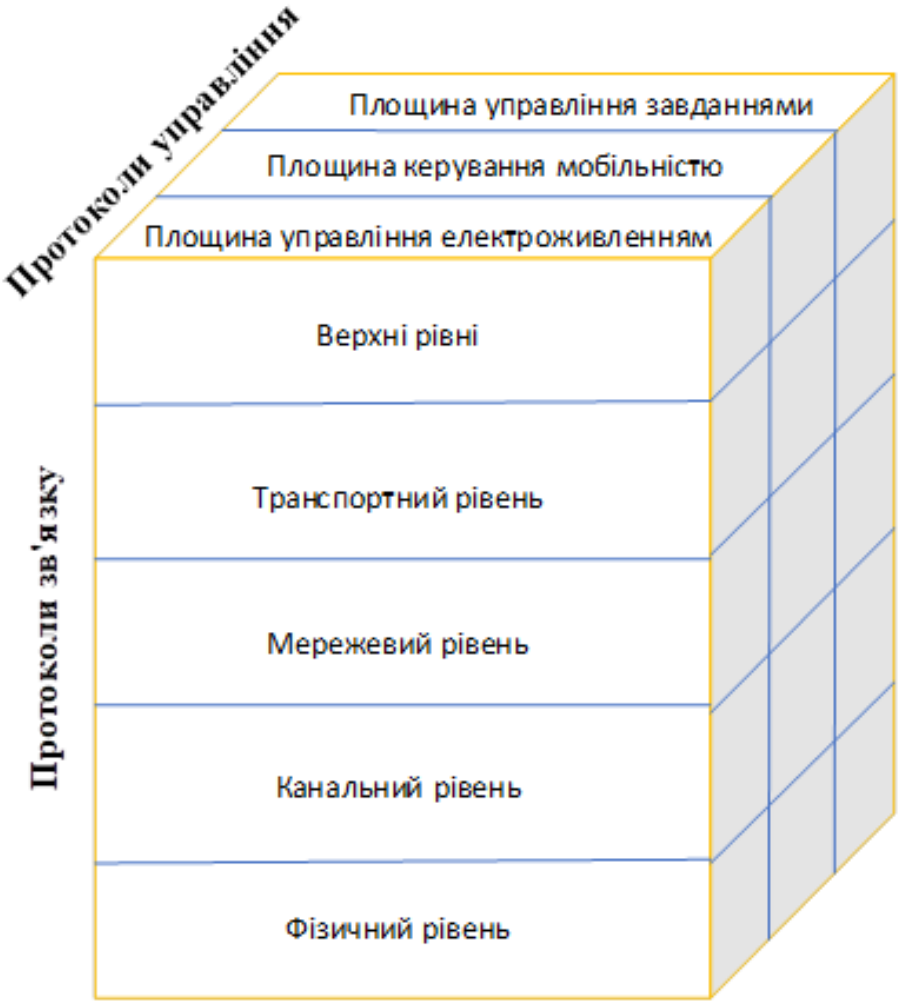


Рисунок 1.6. Загальний стек протоколів для сенсорних мереж.

Таблиця 1.2. Можливий стек протоколу WSN [17]

Верхні рівні	Програми мережі, що включають обробку, агрегацію даних, зовнішню обробку запитів і зовнішню базу даних
Рівень 4	Транспортний, включаючи розподіл та накопичення даних, кешування та зберігання

Продовження таблиці 1.2.

Рівень 3	Мережевий, включаючи адаптивне управління топологією та топологічну маршрутизацію
Рівень 2	Канальний, спільний доступ до каналу (MAC), синхронізація та місце розташування
Рівень 1	Фізичний, комунікаційний канал, вимірювання, приведення в дію та обробка сигналів

1.3.3.1 Технології бездротової передачі даних в WSN

Для бездротових сенсорних систем використовуються різноманітні бездротові радіо-інтерфейси, які забезпечують зв'язок між сенсорами та іншими елементами мережі.

- Bluetooth (BL): використовується для короткодіючих з'єднань, ідеально підходить для зв'язку між сенсорами та мобільними пристроями.
- Zigbee: забезпечує низькоспоживчий та недорогий бездротовий зв'язок для мереж малого діапазону, часто використовується в сенсорних мережах.
- Wi-Fi: використовується для широкосмугового бездротового доступу, забезпечуючи високу швидкість передачі даних.
- Z-Wave: стандарт для низької потужності, оптимізований для використання в домашніх автоматизованих системах та сенсорних мережах.
- LoRa (Long Range): забезпечує далекий зв'язок та низьку споживану потужність, ідеальний для великомасштабних сенсорних мереж.
- NB-IoT (Narrowband IoT): використовується для підключення різноманітних пристроїв в Інтернеті речей, надає далекий зв'язок та довгий термін служби батареї.

- Thread: стандарт, розроблений для домашніх мереж, що використовує стандарт IEEE 802.15.4.

IEEE 802.15.1 відомий під назвою *Bluetooth*, став однією з перших технологій для бездротового з'єднання короткого діапазону між різними пристроями. Зорієнтований на створення бездротових персональних мереж (англ. Wireless Personal Area Networks (WPANs)), стандарт забезпечує зв'язок між обмеженим числом пристроїв у невеликому просторі. Це визначає його основну роль у створенні зручних та ефективних інтерфейсів для особистих пристроїв.

Радіофізичний рівень цього стандарту передбачає роботу на неліцензійному діапазоні ISM (англ. Industrial, Scientific, Medical) на частоті 2,4 (ГГц). Також передбачається застосування трансиверу з можливістю стрибків по частоті з метою боротьби з інтерференцією та завмираннями сигналу. В радіочастотній роботі використовується двійкова частотна модуляція для мінімізації складності передавача[23].

Під час типової роботи, група пристроїв користується одним радіоканалом, який синхронізований за спільним годинником та шаблоном стрибків по частоті. Один пристрій виступає як точка синхронізації і відомий як master, а всі інші – як slaves. Така синхронізована група пристроїв утворює піконет, що є основною формою комунікації у цій технології. Пристрої в піконеті користуються спеціальним шаблоном стрибків по частоті, який визначається алгоритмічно на основі полів в адресі пристрою та годинника майстра. Основний шаблон стрибків представляє собою псевдовипадковий порядок із 79 частот в діапазоні ISM. Цей шаблон може бути налаштований для виключення певних частот, які використовуються заважаючими пристроями. Адаптивна техніка стрибків покращує взаємодію з статичними (нестрибкими) системами ISM, коли вони розташовані поруч і втілює деякі рекомендації стандарту IEEE 802.15.2-2003. Фізичний канал розбивається на часові інтервали, які називаються слотами. Дані передаються між пристроями у вигляді пакетів, розміщених у цих слотах. У відповідних обставинах може виділятися кілька послідовних слотів для передачі одного пакета. Стрибки по частоті відбуваються між передачею або прийманням пакетів. Цей стандарт забезпечує можливість

повнодуплексної передачі за допомогою схеми поділу часу (англ. Time Division Duplex (TDD)) [23].

Вище фізичного каналу існує ієрархія зв'язків, каналів та пов'язаних контрольних протоколів. Ієрархія каналів та зв'язків від фізичного каналу вгору виглядає наступним чином: фізичний канал, фізичний зв'язок, логічний транспорт, логічний зв'язок та канал L2CAP[23]. L2CAP (англ. Logical Link Control and Adaptation Protocol) – це протокол керування та адаптації логічного зв'язку в стеку протоколів Bluetooth. Він є частиною Bluetooth стеку і відповідає за управління логічним зв'язком між двома пристроями Bluetooth. L2CAP дозволяє вищим рівням стеку протоколів використовувати Bluetooth для передачі різноманітних типів даних, таких як аудіо, відео, або дані з додатків. Зокрема, L2CAP відповідає за фрагментацію та збірку даних, адаптацію розміру пакетів та управління даними між різними логічними з'єднаннями на одному фізичному зв'язку Bluetooth. L2CAP грає важливу роль у забезпеченні ефективного використання Bluetooth для передачі різноманітних видів інформації між пристроями.

На даний момент спільнотою Bluetooth Special Interest Group, завданням котрої є розробка та підтримка специфікацій Bluetooth, що включає в себе нові версії стандарту (удосконалення та розширення можливостей технології) розглядається кілька варіацій Bluetooth. Зокрема Bluetooth® Classic та Bluetooth® Low Energy (LE)(табл.1.3)[24].

Bluetooth Classic, це власне стандарт описаний вище, також ще відомий, як Bluetooth Basic Rate/Enhanced Data Rate (BR/EDR), та передбачає передачу даних через 79 каналів у неліцензійному частотному діапазоні промисловості, науки та медицини на частоті 2,4 (ГГц). Bluetooth Classic найчастіше використовується для безпровідного відтворення аудіо та є основним стандартним протоколом для бездротових пристроїв, таких як динаміки, навушники та розважальні системи у машині. Окрім цього, він дозволяє передачу даних, включаючи віддалений друк, і забезпечує можливість спілкування між пристроями безпосередньо між собою [24].

Bluetooth Low Energy (LE) є спеціально розробленим радіоінтерфейсом, з метою ефективного використання енергії. Радіоінтерфейс передає дані через 40

каналів у неліцензованому частотному діапазоні 2,4 (ГГц). Така технологія підтримує різні топології комунікаційних мереж, від «точка-точка», до «mesh» мереж, що дозволяє створювати надійні та масштабовані мережі пристроїв. І хоча спочатку Bluetooth LE використовувався лише для взаємодії між пристроями, зараз його широко застосовують, як технологію позиціонування пристроїв. На даний момент Bluetooth LE також включає функції, які дозволяють одному пристрою визначати присутність, відстань та напрямок до іншого пристрою [24].

Таблиця 1.3. Порівняння Bluetooth Classic та Bluetooth LE[24].

	Bluetooth LE	Bluetooth Classic
Частотний діапазон	2,4 (ГГц) ISM-діапазон (використовується в діапазоні 2,402 – 2,480 (ГГц)).	2,4 (ГГц) ISM-діапазон (використовується в діапазоні 2,402 – 2,480 (ГГц)).
Канали	40 каналів із інтервалом у 2 (МГц) (3 канали оголошення/ 37 каналів для передачі даних).	79 каналів із інтервалом у 1 (МГц).
Використання каналів	Псевдовипадкове перелаштування робочої частоти (англ. Frequency-hopping spread spectrum)	Псевдовипадкове перелаштування робочої частоти (англ. Frequency-hopping spread spectrum)
Модуляція	Гаусівська частотна маніпуляція (англ. GFSK)	GFSK, π/4 DQPSK, 8DPSK

Продовження таблиці 1.3.

Швидкість передачі даних	LE 2M PHY: 2 (Мбіт/с); LE 1M PHY: 1 (Мбіт/с); LE Coded PHY (S=2): 500 (кбіт/с); LE Coded PHY (S=8): 125 (кбіт/с);	EDR(Enhanced Data Rate) PHY (8DPSK): 3 (Мбіт/с); EDR PHY (π/4 DQPSK): 2 (Мбіт/с); BR PHY (GFSK): 1 (Мбіт/с);
Транспорт даних. Методи або канали передачі даних	Асинхронне з'єднання з орієнтованою на з'єднання передачею даних(англ. ACO); Ізохронне з'єднання з орієнтованою на з'єднання передачею даних(англ. SCO); Асинхронна безз'єднана передача даних(англ. ACL); Синхронна безз'єднана передача даних(англ. SCO); Ізохронна безз'єднана передача даних(англ. ISCO).	Асинхронне з'єднання з орієнтованою на з'єднання передачею даних(англ. ACO); Синхронне з'єднання з орієнтованою на з'єднання передачею даних(англ. ACO);
Топологія мереж	Точка-точка (включаючи піконет); Широкомовна передача; Сітчаста мережа(Mesh)	Точка-точка (включаючи піконет);

Продовження таблиці 1.3.

Можливості визначення місцезнаходження	Оголошення про присутність; Визначення напрямку (AoA/AoD)(AoA (англ. Angle of Arrival) та AoD (англ. Angle of Departure))	-

Таким чином, Bluetooth вирізняється різноманітністю швидкостей передачі даних, від базових 1 (Мбіт/с) до вищих, таких як 2 (Мбіт/с) та 3 (Мбіт/с) (залежно від версії), що робить його адаптованим до різних вимог та сценаріїв використання.

Дальність зв'язку Bluetooth може коливатися від кількох метрів у приміщенні до більше як 100 метрів на відкритому повітрі, враховуючи версію протоколу та конкретні умови експлуатації. Bluetooth може бути успішно вбудований в різноманітні пристрої, завдяки низькопотужній технології, що використовується в стандарті. Це робить його особливо корисним для пристроїв з обмеженим живленням.

Bluetooth володіє безсумнівними перевагами, такими як простота використання, низька складність налаштувань та широкий спектр застосувань. З іншого боку, його обмежена дальність та можливість втрати з'єднання в забруднених бездротових середовищах, тобто в середовищах, де паралельно використовуються технології, що працюють на тих же частотах, зокрема Wi-Fi, може бути важливим фактором у деяких сценаріях використання. Для подолання таких обмежень використовується адаптивна зміна частоти (англ. Adaptive frequency hopping (AFH)).

IEEE 802.11 також відомий як ***Wi-Fi***, представляє собою надзвичайно важливий стандарт для бездротового зв'язку в різних пристроях та середовищах. Орієнтований на створення локальних мереж (англ. Local Area Networks (LANs)), IEEE 802.11 забезпечує бездротовий зв'язок між пристроями у відносно невеликому просторі. Це дозволяє пристроям обмінюватися даними та отримувати доступ до ресурсів мережі без необхідності фізичних з'єднань. Перша версія 802.11 була

представлена у 1997 році і встановлювала норми для рівня управління доступом та фізичного рівня для входження в мережу. На фізичному рівні ці стандарти визначали два режими модуляції радіочастот та один режим інфрачервоного передавання в діапазоні частот 2,4 (ГГц), призначеного для промислових, наукових та медичних (ISM) застосувань. Розрахована швидкість передачі даних становила 2 (Мбіт/с). Далі у 1999 році було додано ще дві версії стандарту IEEE 802.11a і IEEE 802.11b. Стандарт 802.11a встановлював фізичний рівень з можливістю передачі даних до 54 (Мбіт/с) у діапазоні частот 5 (ГГц) ISM. Стандарт 802.11b визначав фізичний рівень із швидкістю передачі даних до 11 (Мбіт/с) у діапазоні частот 2,4 (ГГц) ISM [25].

Стандарт постійно розвивається і кожне наступне покоління покликане корегувати обмеження та розв’язати проблеми, з котрим стикаються попередні. У 2019 році був офіційно представлений стандарт Wi-Fi 6 (802.11ax), що впроваджує нові технології, такі як uplink MU-MIMO (англ. Multi-User, Multiple Input, Multiple Output), ортогональний багатоканальний доступ за частотним розділенням (англ. Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)) та кодування 1024-QAM(англ. Quadrature Amplitude Modulation). Wi-Fi 6 покращує ємність мережі та ефективність передачі даних, повністю використовуючи ресурси спектра та дозволяючи багатьом терміналам одночасно підключатися до мережі. В порівнянні з попередніми поколіннями, тим же Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 спрямований на збільшення середньої пропускної здатності користувачів, принаймні в чотири рази, та кількості одночасних користувачів, більше, ніж у три рази в умовах високої щільності мережі. Отже, Wi-Fi 6 також відомий, як високоефективний WLAN (англ. High Efficiency Wireless(HEW)). Порівняння деяких початкових та використовуваних стандартів наведено в таблиці 1.4. [25].

Таблиця 1.4. Порівняння характеристик стандартів Wi-Fi [25].

Рік появи	Стандарт зв'язку	Діапазон частот(ГГц)	Ширина каналу(МГц)	Швидкість передачі(Мбіт/с)	Сумісність з іншими стандартами 802.11

Продовження таблиці 1.4.

1999	802.11a	5	20	54	Несумісний
1999	802.11b	2,4	20	11	Несумісний
2003	802.11g	2,4	20	54	Сумісний з 802.11b
2009	802.11n	2,4 та 5	20/40	300/450/600	Сумісний з 802.11a/b/g
2013	802.11ac	5	80/160	433/867/1730	Сумісний з 802.11a/n
2019	802.11ax	2,4 та 5	20/40/80/160	574/860/1147/ 2402/3603/4804	Сумісний з 802.11a/b/g/n/ac

Таким чином, стандарт продовжує розвиватися при співпраці IEEE та Wi-Fi Alliance®[26]. Однією з переваг є його широка підтримка та універсальність, яка забезпечує зв'язок між різноманітними пристроями. Проте, Wi-Fi має і свої недоліки. В залежності від варіації стандарту, є імовірність високої споживаної енергії, що може бути невигідним для сенсорних мереж, орієнтованих на ефективне використання енергії. Обмежена дальність передачі та можливість конфліктів частот також можуть вплинути на ефективність мережі в різних сценаріях.

IEEE 802.15.4, Zigbee. IEEE 802.15.4 є стандартом, орієнтованим на створення бездротових мереж, де пристрої можуть взаємодіяти в невеликому просторі. Його застосування включає бездротові сенсорні мережі, системи автоматизації та моніторингу.

Такий стандарт послужив основою для розвитку різноманітних технологій та протоколів. Деякі з технологій, створених на основі IEEE 802.15.4, включають зокрема Zigbee, Thread, 6LoWPAN (англ. IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks).

IEEE Std 802.15.4 визначає специфікації фізичного рівня (англ. Physical Layer (PHY)) і підрівня керування доступом до середовища (англ. Medium Access Control (MAC)) для бездротового з’єднання з низькою швидкістю передачі даних із

стаціонарними, портативними та рухомими пристроями без батареї або з дуже обмеженим споживанням енергії, які зазвичай працюють у «особистому робочому просторі» (англ, Personal Operation Space (POS)) 10 (м)[27].

Працюючи в бездротових персональних мережах низької швидкості, стандарт покликаний відповідати цілям бездротової персональної мережі з низькою швидкістю передачі даних (англ. Low-Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPAN)). Наприклад, має бути легкість у встановленні, надійна передача даних, робота на коротких відстанях, низька вартість та розумний термін служби батареї, простий та гнучкий протокол тим часом, також має зберігатися. Деякі характеристики LR-WPAN включають [27]:

- швидкість передачі даних по повітрю 250 (кбіт/с), 40 (кбіт/с) і 20 (кбіт/с);
- топологія зірка, або peer-to-peer;
- виділені 16-бітні короткі або 64-бітні розширені адреси;
- розподіл гарантованих часових інтервалів (англ. Guaranteed Time Slot (GTS));
- доступ до каналу з використанням методу множинної перевірки несучої із уникання конфліктів (англ. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA-CA));
- протокол повного підтвердження для забезпечення надійності передачі;
- низьке енергоспоживання;
- виявлення енергії (англ. Energy Detection (ED));
- індикація якості зв'язку (англ. Link Quality Indicator (LQI));
- 16 каналів в діапазоні 2450 (МГц), 10 каналів в діапазоні 915 (МГц) і 1 канал в діапазоні 868 (МГц).

Стандарт 802.15.4 визначає фізичний та рівень доступу(MAC), тоді як ZigBee визначає мережевий та програмний рівні. Zigbee – це відкритий стандарт для надійного, економічно ефективного, малопотужного бездротового зв'язку між пристроями, за стандартизацію котрого відповідає Альянс стандартів підключення (англ. Connection Standards Alliance (CSA). До Альянсу стандартів підключення (раніше Альянс Zigbee) належить понад 400 компаній. CSA відповідає за три

напрямки: мережева взаємодія в Zigbee, прикладний рівень Zigbee, сертифікація на відповідність. Альянс прийняв стандарт IEEE 802.15.4., а мережевий, безпековий і прикладний рівні були розроблені Альянсом(рис. 1.7.)[28].

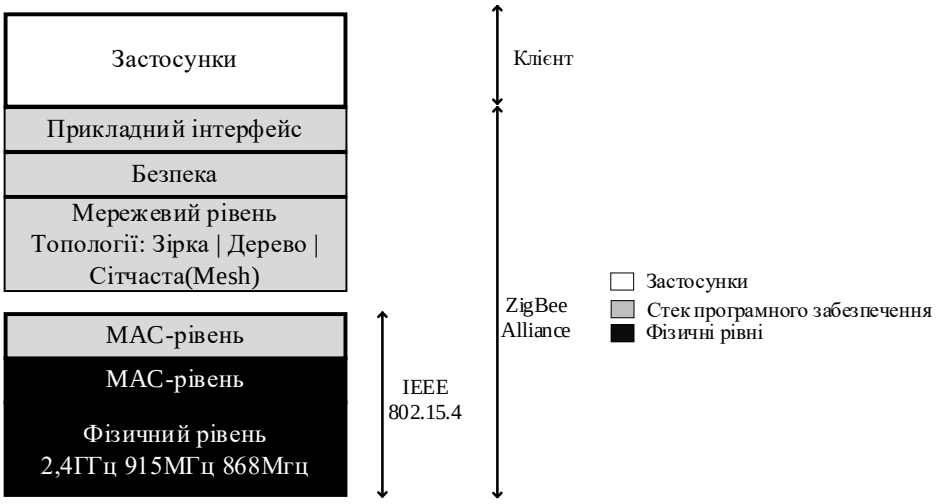


Рисунок 1.7. Архітектура Zigbee.

Загальні характеристики для мережі Zigbee наступні [28]:

- низька потужність - пристрої можуть працювати протягом кількох років на батарейках типу АА при відповідно налаштованих робочих циклах. При продуманій архітектурі та спеціальних технологіях використання акумуляторів, деякі пристрої Zigbee, такі, як газові лічильники, можуть забезпечувати роботу протягом 20 років від одного заряду акумулятора;
- низька швидкість передачі даних – діапазон 2,4 (ГГц) підтримує швидкість передачі даних 250 (кбіт/с). Фактичний стійкий трафік через мережу менший, ніж теоретична радіоємність. Таким чином, Zigbee краще використовувати для застосувань зі збору та моніторингу або базових управлінських застосувань.
- малі та великі мережі – мережі Zigbee можуть варіюватися від кількох до тисяч пристроїв, які спілкуються між собою безшовно;
- зона покриття – типові пристрої мають достатню зону покриття для стандартного житлового приміщення. Готові конструкції зі підсилювачами

передавача суттєво розширюють зону покриття. Розширений спектр використовується на фізичному рівні, щоб бути більш стійким до перешкод;

- проста мережева інсталяція, запуск і експлуатація – стандарт Zigbee підтримує кілька топологій мережі. Прості протоколи для створення та приєднання до мереж дозволяють системам автоматично налаштовувати та вирішувати проблеми маршрутизації при їх виникненні.

Z-Wave. Z-Wave є стандартом для забезпечення надійного та енергоефективного бездротового зв'язку в галузі домашньої автоматизації. Стандарт Z-Wave орієнтований на застосування для пристроїв, які вимагають низької потужності та можуть працювати на батарейках протягом тривалого часу. Його пропускна здатність зазвичай становить від 9,6 (кбіт/с) до 100 (кбіт/с), залежно від версії Z-Wave. Дальність передачі стандартно складає близько 30 метрів, але може бути збільшена за допомогою маршрутизації через інші пристрої Z-Wave. Основи технології Z-Wave [29]:

- технологія радіочастотного зв’язку з низьким енергоспоживанням, яка підтримує повну сітчасту мережу без потреби у вузлі-координаторію;
- працює в діапазоні нижче 1 (ГГц); несприйнятливий до перешкод від Wi-Fi та інших бездротових технологій у діапазоні 2,4 (ГГц) (табл. 1.5. [30]);
- рівні Z-Wave PHY і MAC визначені Рекомендацією ITU-T G.9959;
- розроблений спеціально для додатків керування та визначення статусу, підтримує швидкість передачі даних до 100 (Кбіт/с), із шифруванням AES128, IPV6 і багатоканальною роботою;
- повна сумісність через рівень 6 із зворотною сумісністю з усіма версіями;
- успішно поєднано та випробувано з протоколами Smart Energy;
- має таке ж положення в Каталозі стандартів Національного інституту стандартів і технологій (англ. National Institute of Standards and Technology (NIST)) та Консорціуму для розвитку стандартів інтернету розумних мереж (англ. Smart Grid Interoperability Panel (SGIP)), як і родини стандартів IEEE 802.11, 802.15 і 802.16.

Тобто дана технологія визнана відомою та важливою в контексті стандартів для бездротових мереж, подібно до родини стандартів IEEE 802.11 та IEEE 802.16.

Таблиця 1.5 Радіочастота Z-Wave в Україні [30]

Країна/регіон	Стандарт	Частота Z-Wave (МГц)	Напруга (В)	Частота в електромережі (Гц)	Версія модуля	Бібліотека підпрограм
CEPT*	EN 300 220	868.4, 869.85	220	50	E	EU

Де * CEPT є європейською регіональною організацією, яка займається питаннями пошти та телекомунікацій і наразі налічує 45 членів: Албанія, Андорра, Австрія, Азербайджан, Білорусь, Бельгія, Боснія та Герцеговина, Болгарія, Хорватія, Кіпр, Чеська Республіка, Данія, Естонія, Фінляндія, Франція, Німеччина, Греція, Угорщина, Ісландія, Ірландія, Італія, Латвія, Ліхтенштейн, Литва, Люксембург, Мальта, Молдова, Чорногорія, Монако, Нідерланди, Норвегія, Польща, Португалія, Румунія, Сан-Марино, Сербія, Словаччина, Словенія, Іспанія, Швеція, Швейцарія, колишня Югославська Республіка Македонія, Туреччина, Україна, Велика Британія та Ватикан.

Отже, серед переваг Z-Wave слід відзначити його низьке споживання енергії, легку інтеграцію та високу сумісність між пристроями. Також він забезпечує стабільний зв'язок у великих будівлях завдяки маршрутизації. Однак є недоліки, такі як обмежена пропускна здатність, що може бути недостатньою для обробки великих об'ємів даних. Також деяке обладнання може вимагати додаткових підсилювачів для покращення дальності сигналу. У контексті бездротових сенсорних мереж, Z-Wave представляє собою ефективний стандарт для домашньої автоматизації, де низьке споживання енергії та ефективний зв'язок важливі для успішного функціонування систем.

Стандарти стільникового зв'язку. У сучасних сенсорних системах із бездротовим зв'язком, у залежності від конкретних вимог, застосувань та області впровадження, основні технології мобільного зв'язку, які можуть бути використані в WSN, включають:

- GSM/GPRS/EDGE (2G): Стандарт 2G, такий як GSM (англ. Global System for Mobile Communications), GPRS (англ. General Packet Radio Service) і EDGE (англ. Enhanced Data Rates for GSM Evolution), може використовуватися для передачі даних в бездротових сенсорних мережах;
- 3G (UMTS): Стандарт 3G такий, як UMTS (англ. Universal Mobile Telecommunications System) надає покращені можливості передачі даних;
- 4G LTE: Стандарт 4G LTE (англ. Long-Term Evolution) забезпечує високу пропускну здатність та низьку затримку, що робить його ідеальним для додатків WSN, де важлива швидкість передачі даних;
- 5G NR: Покоління 5G NR (англ. New Radio) пропонує ще більш високу швидкість передачі даних, низьку затримку та збільшену підтримку кількості підключених пристроїв.

GSM. GSM використовує метод множинного доступу з поділом за часом (англ. Time Division Multiple Access (TDMA)), щоб забезпечити голосові та послуги передачі даних через мобільні мережі. Ідея GSM виникла в середині 1970-х років із розробки портативного радіо в Bell Laboratories. GSM – це термін, що позначає групу організацій, заснованих у 1982 році з метою розробки стандарту стільникового зв'язку для Європи. GSM є системою з комутацією каналів, стандарт працює у діапазонах 900 (МГц) і 1800 (МГц) в більшості країн світу, та в межах 850 (МГц) та 1900 (МГц) у США. Кожен канал 200 (кГц) розділяється на вісім часових інтервалів 25 (кГц). Стандарт має здатність передавати інформацію зі швидкістю від 64 до 120 (кбіт/с). [31].

Протягом етапів еволюції стандарту виділяються модифікації: GSM Phase 1, GSM Phase 2, GSM Phase 2+. Кожна нова версія відзначається значним розширенням можливостей стандарту.

Архітектура GSM має три основні підсистеми, які складаються з багатьох функціональних блоків(рис. 1.8.) [32]:

- Мобільна станція (англ. Mobile Station(MS)). MS складається з фізичного обладнання, яке використовується абонентом Public PLMN (англ. Public Land Mobile Network) для підключення до мережі. Сама ж MS складається з мобільного

обладнання (англ. Mobile Equipment (ME)) і модуля ідентифікації абонента (англ. Subscriber Identity Module (SIM)). Мобільне обладнання може бути переносним, встановленим на транспортному засобі або триматися в руках. Обладнання для кінцевого користувача ME входить до складу мобільного терміналу (англ. Mobile Terminal (MT)) і залежить від програм та послуг;

- Підсистема Базової Станції (англ. Base Station Subsystem (BSS)), складається із базового контролера станції (англ. Base Station Controller (BSC)) та однієї чи кількох базових станцій приймач-передавач (англ. Base Transceiver Station (BTS));

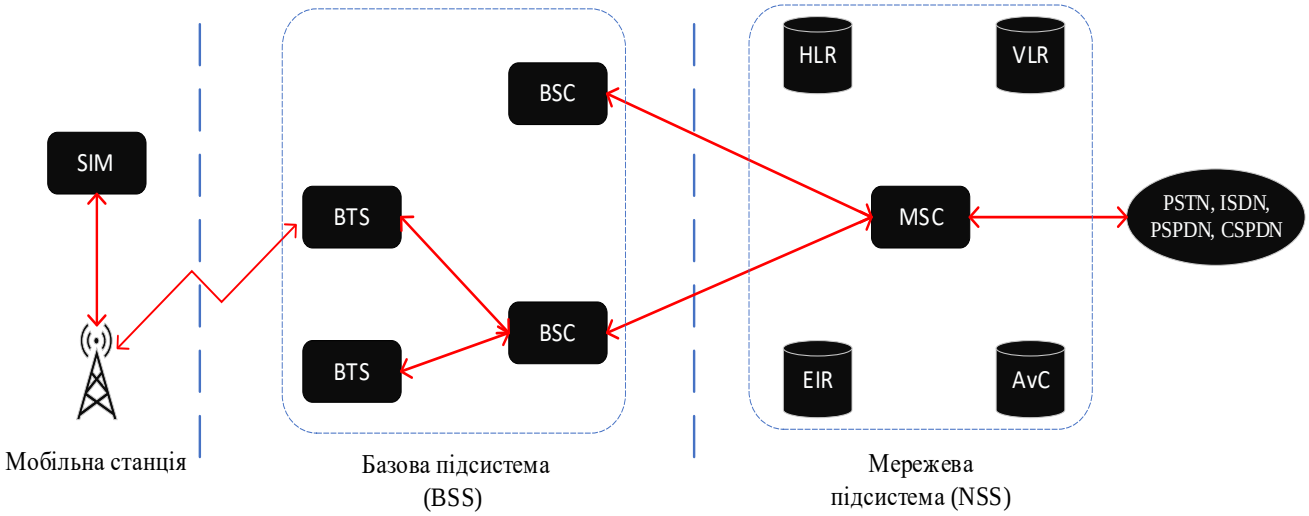


Рисунок 1.8. Архітектура GSM.

- Підсистема Перемикання Мережі (англ. Network Switching Subsystem(NSS)). Підсистема забезпечує взаємодію між стільниковими мережами та загальнодоступними телекомунікаційними мережами (англ. Public Switched Telephone Network (PSTN), англ. Integrated Services Digital Network (ISDN), або мережами передачі даних). NSS керує передачею послуг між областями обслуговування в різних BSS, проводить аутентифікацію користувачів, перевіряє їх облікові записи та включає функції для забезпечення глобального роумінгу мобільних абонентів. NSS логічно, та в залежності від фізичного втілення, розподілена на: Центр комутації мобільного зв'язку (англ. Mobile Switching Center

(MSC)), Реєстр місцезнаходження абонента (англ. Home Location Register (HLR)), Реєстр місцезнаходження відвідувача (англ. Visitor Location Register (VLR)), Центр аутентифікації (англ. Authentication Cente (AuC)), Реєстр ідентифікації обладнання (англ. Equipment Identity Register (EIR)), Функції міжмережевої взаємодії (англ. Interworking Function (IWF));

Отже, переваги стандарту GSM включають глобальне покриття, міжнародний роумінг, підтримку голосового та текстового зв'язку, а також високу надійність та стандартизовану архітектуру. Однак GSM має обмежену пропускну здатність для передачі даних, може виникати затримка в мережі, особливо в зоні великої концентрації користувачів, і володіє відносно низькою швидкістю передачі даних порівняно з сучасними технологіями.

UMTS. Universal Mobile Telecommunications System це стандарт третього покоління мобільного зв'язку, що представляє еволюцію послуг та швидкості передачі даних, порівняно з мобільними мережами 2G. Роботи над мобільними мережами 3-го покоління почалися ще з 1991 року. Специфікації UMTS розробляються в 3GPP (англ. 3rd Generation Partnership Project). Щоб досягти глобального впровадження 3GPP запроваджувало UMTS поетапно[33].

До основних компонентів UMTS відносять (рис. 1.9.):

- UMTS Terrestrial Radio Access Network(UTRAN). Це мережа радіодоступу UMTS, яка складається з базових станцій (англ. NodeB) і контролерів базових станцій (англ. Radio Network Controller (RNC)). UTRAN відповідає за радіодоступ і управління ресурсами на бездротовому каналі;
- Core Network (CN): Це основна мережа, яка обробляє комутацію даних і здійснює з'єднання між користувачем та іншими мережами. Вона включає в себе такі елементи, як MSC (англ. Mobile Switching Center), SGSN (англ. Serving GPRS Support Node) та інші, які взаємодіють для керування та пересилання даних;
- User Equipment (UE). Це термінал абонента, такий як мобільний телефон або інший пристрій, який використовується кінцевим користувачем для доступу до послуг мережі UMTS.

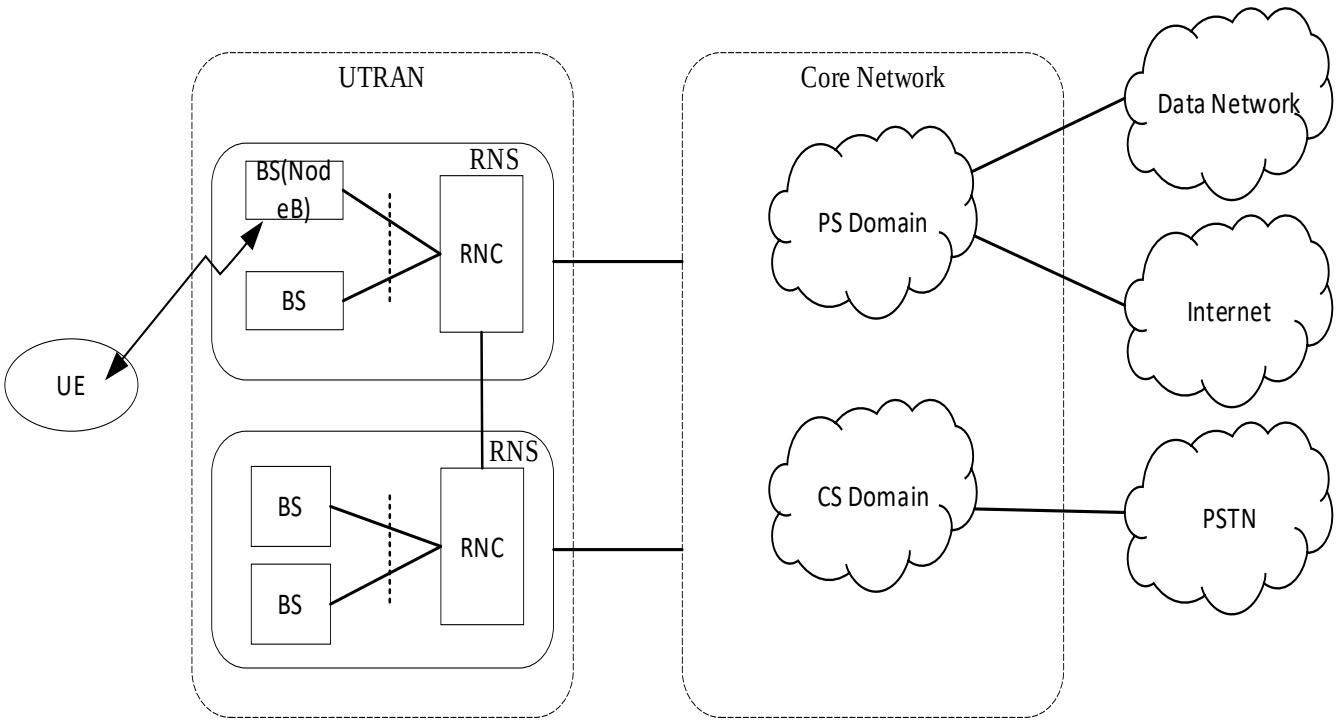


Рисунок 1.9. Узагальнена архітектура UMTS.

Де PS – «область комутації пакетів» (англ. Packet Switched domain (PS)), область мережі мобільного зв'язку, що забезпечує передачу даних у пакетному режимі. У PS domain дані передаються у вигляді пакетів через мережу з використанням IP (англ. Internet Protocol) або подібних протоколів; CS – «область комутації каналів»((англ. Circuit-Switched domain(CS), домен з комутацією каналів відноситься до частини мобільної мережі, яка обслуговує послуги голосу та даних із комутацією каналів. У області CS виділені канали зв’язку встановлюються на час розмови і з’єднання залишається безперервним протягом усієї розмови.

UTRAN стандартизовано в режимах TDD (англ. Time Division Duplex) та FDD (англ. Frequency Division Duplex). Швидкості передачі даних визначені в залежності від умов переміщення абонента: 144 (кбіт/с) при русі, 384 (кбіт/с) у випадку обмеженого руху та 2 (Мбіт/с) у стабільному положенні всередині приміщення [34].

Передавач UTRAN/FDD призначений для роботи в одному або декількох діапазонах частот у межах будь-якої з наступних здвоєних частотних смуг представлених у [35].

Отже, пропускна здатність у мережах UMTS може досягати декількох (Мбіт/с), а дальність передачі становить кілька кілометрів, залежно від конфігурації та частотного діапазону. Система включає базові станції, комутаційні центри, термінали користувачів та інфраструктуру передачі даних. Переваги включають високу пропускну здатність та відносно велику зону обслуговування. Недоліки – високе енергоспоживання та відносно складна інфраструктура.

4G – LTE. Long Term Evolution (LTE) — це технологія 4-го покоління (англ. 4-th Generation(4G)), розроблена для глобальної системи мобільного зв'язку (GSM). Стандарт затверджений у 2008 році, LTE зі швидкістю завантаження до 173 (Мбіт/с) був описаний 3GPP у специфікації 3GPP Release 8. У порівнянні з попередніми системами 3G, включаючи UMTS і GSM, LTE використовує інший радіоінтерфейс та пакетну структуру. Таким чином, базовий LTE представляє собою набір покращень для UMTS, які були впроваджені у випуску 8 3GPP [36].

LTE Advanced – це технологія мобільного зв’язку, яка є основним удосконаленням технології Long Term Evolution. LTE Advanced сумісний із початковою технологією LTE. LTE Advanced використовує значну кількість технік, які поліпшують продуктивність та забезпечують вищі швидкості передачі даних, особливо «на межі» обчислень, де зазвичай продуктивність може бути не такою високою. LTE та LTE Advanced використовують технологію MIMO, котра дозволяє збільшити швидкість передачі даних. MIMO – це тип антенної технології, яка використовує кілька антен для того, щоб сигнали, що проходять різними шляхами, залишалися нез'єднаними, тим самим використовуючи їхню ємність для підвищення пропускної здатності даних і/або співвідношення сигнал/шум, що в кінцевому підсумку покращує продуктивність системи [37].

Ключовими елементами архітектури мережі LTE (рис 1.10.) є обладнання користувача (англ. User Equipment (UE)), розширена мережа наземного радіодоступу UMTS (англ. Evolved UMTS Terrestrial Radio Access (E-UTRAN)) і розвинене пакетне ядро (англ. Evolved Packet Core(EPC)). У свою чергу EPC складається з [37]:

- The Mobility Management Entity (MME): управляє станами сесій та забезпечує аутентифікацію користувача, а також відстеження користувача в мережі;
- Serving Gateway (S-Gateway, SGW): основна функція "Сервісного Шлюзу" полягає в маршрутизації та пересиланні користувацьких пакетів даних;
- Packet Data Node Gateway (PGW): "Шлюз Пакетних Даних" виступає, як інтерфейс між LTE-мережею та іншими мережами пакетних даних.

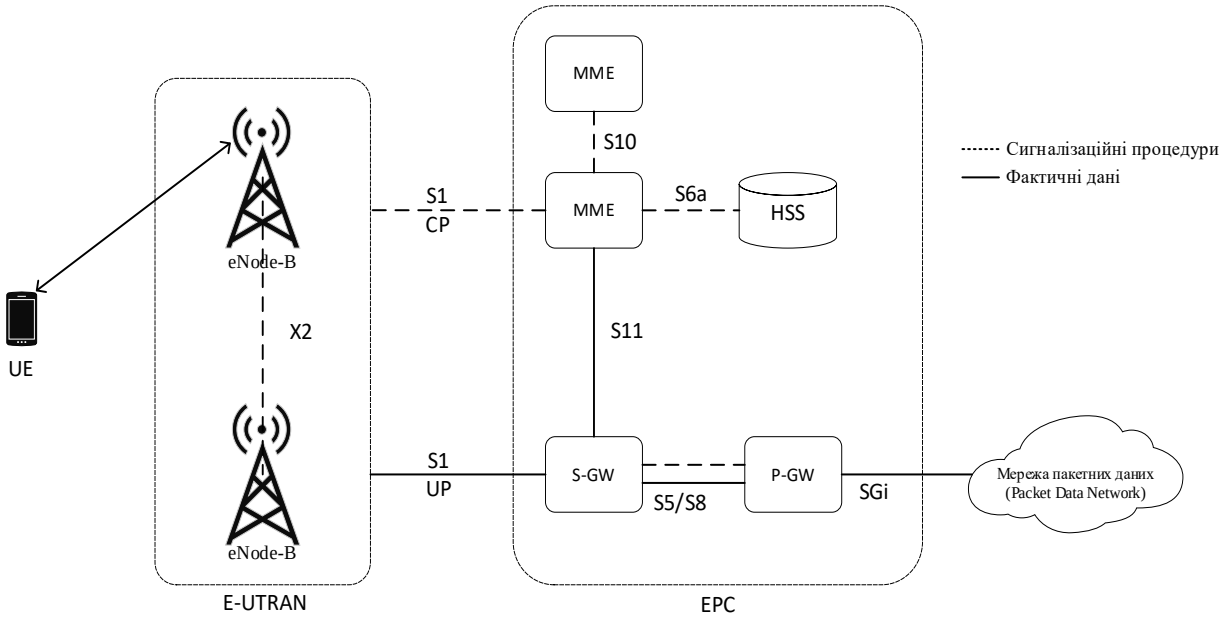


Рисунок 1.10. Архітектура мережі LTE.

Частотні діапазони для LTE різняться у різних країнах світу. Існують два основних типи діапазонів частот для LTE: FDD і TDD. FDD, або подвійне розділення за частотою, означає, що кожний діапазон частот FDD-LTE складається з пари частот – одна використовується для зворотного зв'язку, інша – для прямого. З іншого боку, TDD, або подвійне розділення за часом, використовує лише один діапазон, який служить як для зворотного, так і для прямого зв'язку [38].

Розширені можливості мережі LTE-Advanced в порівнянні з попередніми стандартами включають [39]:

- збільшення пікової швидкості передачі даних: Досягнення пікових швидкостей до 3 (Гбіт/с) у низхідному каналі (DL) та до 1,5 (Гбіт/с) у висхідному (UL);
- вища спектральна ефективність: застосування релізу 10 підвищило спектральну ефективність до 30 (біт/с) на 1 (Гц), у порівнянні з релізом 8, де ця величина становила до 16 (біт/с) на 1 (Гц);
- Збільшення кількості одночасно активних абонентів.
- розширення смуг частот та агрегація спектру (англ. Carrier Aggregation): можливість об'єднання несучих смуг дозволяє передавати дані через декілька несучих частот LTE з кожного терміналу і на кожен термінал.

Отже, із точки зору бездротових сенсорних мереж, LTE Advanced може бути важким у використанні через високий рівень споживаної енергії, в порівнянні з традиційними протоколами WSN. Утім, його переваги у швидкості передачі даних та високій спектральній ефективності роблять його привабливим у застосуваннях, де важлива велика пропускна здатність та продуктивність мережі.

5G New Radio. Найбільш передові стільникові мережі на даний момент – це мережі п'ятого покоління (англ. 5-th Generation). Під п'ятим поколінням у телекомунікаційній галузі розуміють технології, що входять до складу 5G New Radio (NR). NR представляє собою комплекс технологій від фізичного рівня радіодоступу в мережі до ядра мережі.

Інновації, які 5G привносить у бездротові технології, охарактеризовані у трьох ключових напрямках, визначених у рамках проекту 3GPP SMARTER (англ. Study on New Services and Markets Technology Enablers)[40]: удосконалений мобільний широкосмуговий зв’язок (англ. enhanced Mobile Broadband (eMBB)), масовий зв’язок машинного типу (англ. massive Machine Type Communications (mMTC)), та ультранадійний зв’язок із низькою затримкою (англ. Ultra-Reliable Low Latency Communications(URLLC)).

Покращений мобільний широкосмуговий зв'язок охоплює різноманітні сценарії доступу до послуг, даних та мультимедійного контенту. Цей напрямок визначає вимоги до високих швидкостей передачі даних, збільшення трафіку, високої густоти

абонентів та їхньої великої мобільності. Передбачається розгортання в різних сценаріях та областях обслуговування, включаючи внутрішнє та зовнішнє середовище, міські та сільські райони, офіси та домашні умови, а також підключення до локальних та широких зон, враховуючи специфічні випадки розгортання, такі як масові події, трансляції, житлові та високошвидкісні мережі, а також транспортні засоби (приклад таблиця 1.6.)[41].

Таблиця 1.6. Вимоги до ефективності для різних сценаріїв швидкості та щільності трафіку.

Сценарії	Випробувана швидкість передачі даних (Низхідна лінія зв'язку)	Випробувана швидкість передачі даних (Висхідна лінія зв'язку)	Пропускна здатність ділянки (НЛЗ)	Пропускна здатність ділянки (ВЛЗ)	Загальна щільність користувачів)	Фактор активності)	Швидкість переміщення обладнання абонента	Покриття
Для міста	50 (Мбіт/с)	25 (Мбіт/с)	100 (Гбіт/с/км^2)	50 (Гбіт/с/км^2)	[10,000]/ (км^2)	20 %	Пішоходи та користувачі транспортних засобів (аж до 120 км/год)	Вся мережа
Для сільської місцевості	50 (Мбіт/с)	25 (Мбіт/с)	1 (Гбіт/с/км^2)	500 (Мбіт/с/км^2)	[100]/ (км^2)	20 %	Пішоходи та користувачі транспортних засобів (аж до 120 (км/год)	Вся мережа
Щільна забудова	300 (Мбіт/с)	50 (Мбіт/с)	750 (Гбіт/с/км^2)	125 (Гбіт/с/км^2)	[25,000]/ (км^2)	10 %	Пішоходи та користувачі транспортних засобів (аж до 60 (км/год)	Ділова частина міста

Продовження таблиці 1.6.

Швидкісний потяг	50 (Мбіт/с)	25 (Мбіт/с)	15 (Гбіт/с/потяг)	7.5 (Гбіт/с/потяг)	[1,000]/потяг	30 %	Користувачі у потягах (аж до 500 (км/год)	Вздовж залізниць
Швидкісний транспортний засіб	50 (Мбіт/с)	25 (Мбіт/с)	100 (Гбіт/с/км^2)	50 (Гбіт/с/км^2)	[4,000]/(км^2)	50 %	Користувачі в транспортних засобах (аж до 250 км/год)	Вздовж доріг

Зв'язок із низькою затримкою та високою надійністю визначається потребою в стійкості, надійності та мінімальних затримках в обслуговуванні, що є ключовим для застосувань у критичних інфраструктурних та промислових автоматизованих системах. У сфері автоматизації та дистанційного керування ставлять за мету досягти надійності на рівні 99,999% швидкостей передачі даних користувача до 100 (Мбіт/с) та затримки 50 (мс) [41].

Масовий зв'язок машинного типу визначається як повністю автоматизований обмін, створення даних та взаємодія між інтелектуальними пристроями без значного чи жодного втручання людини. Мета – використання технологій та сценаріїв mMTC полягає в узгодженні всіх відомих комунікацій машинного типу та пов'язаних із ними послуг та додатків. mMTC має сприяти концепції розумних міст, мережевого суспільства та Інтернету всього (англ. Internet of Everything(IoE)), розширюючи кількість підключених до мережі інтелектуальних пристроїв[42].

Згідно зі специфікаціями 3GPP, розгортання 5G New Radio здійснюється поетапно та існують різні варіанти впровадження 5G. Мережі п'ятого покоління можуть бути реалізовані, як у варіанті несамостійного розгортання (англ. Non-Stand Alone (NSA)) так і самостійного (англ. Stand-Alone" (SA)). Архітектуру SA (рис 1.11) можна розглядати як «повне розгортання 5G», оскільки не потрібні будь-які частини мережі 4G для функціонування [43].

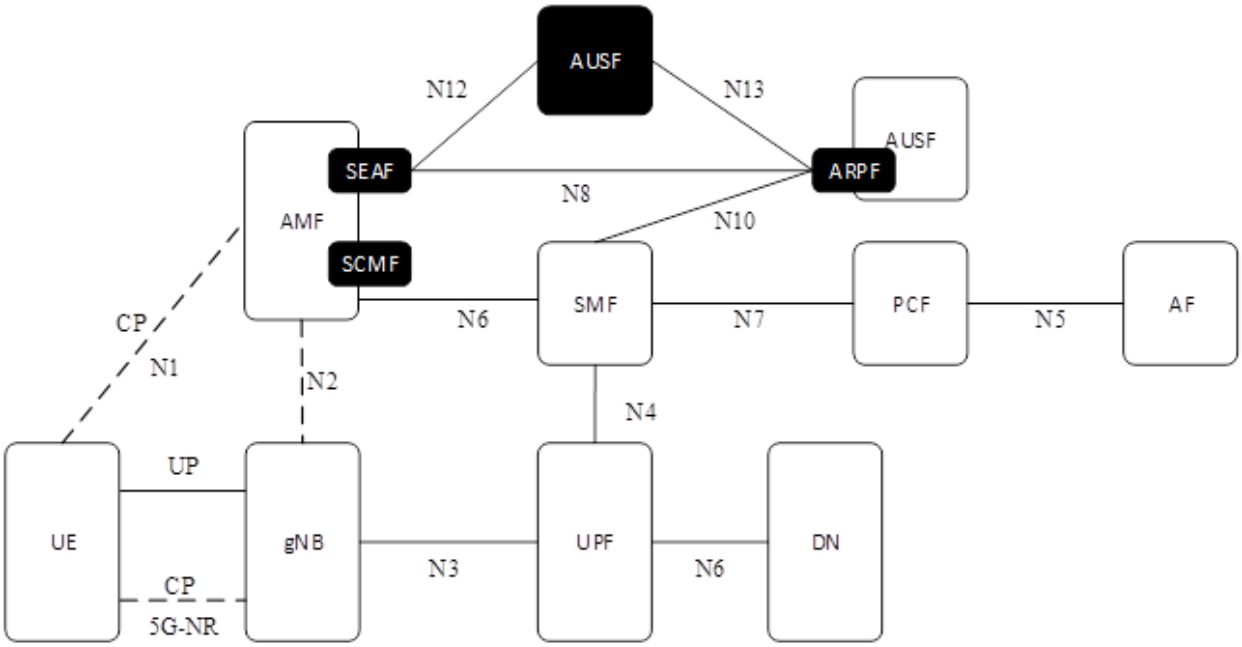


Рисунок 1.11. Архітектура 5G NR SA[44].

Де користувацьке обладнання (англ. User Equipment(UE)), таке як смартфон чи інший пристрій, який використовується кінцевим користувачем для доступу до мережі; gNB (англ. gNodeB) - вузол базової станції 5G, відповідає за передачу і прийом даних між мережею і UE; UPF (англ. User Plane Function) – відповідає за передачу користувацьких даних між UE і мережею; DN (англ. Data Network) - мережа передачі даних, інтернет чи інші мережі, до яких може підключатися UE; AMF (англ. Access and Mobility Management Function) – керує доступом і мобільністю, включаючи реєстрацію користувачів у мережі; SEAF (англ. Security Edge Access Function) – забезпечує захист на межі доступу до мережі; SCMF (англ. Session and Continuity Management Function) – керує сесіями і забезпечує неперервність під час переміщення UE; AUSF (англ. Authentication Server Function) – забезпечує аутентифікацію користувачів в мережі; SMF (англ. Session Management Function) – керує сесіями між UE і мережею; ARPF (англ. Application Rule Function) – застосовує правила для взаємодії з різними додатками та сервісами; PCF (англ. Policy Control Function) – керує політикою доступу та використанням ресурсів; AF (англ. Application Function) – забезпечує взаємодію з різними додатками і сервісами; N1, N2, N3, N5, N6, N7, N8, N10, N12, N13 – інтерфейси взаємодії між різними частинами мережі.

З точки зору бездротових сенсорних мереж (WSN), 5G NR має потенціал для покращення швидкості передачі даних, низької затримки та великої масштабованості, що робить його привабливим для використання в сучасних сенсорних мережах, однак також, як і у випадку попередніх поколінь, залишається ще важливе питання енергоефективності.

Отже під час реалізації систем WSN важливою складовою залишається вибір бездротового інтерфейсу. Вибір застосовуваних технологій залежить від того, яка пропускна здатність необхідна, діапазону передачі, частоти передачі, ліцензування.

У таблиці 1.7. зведено приклади деяких типових протоколів нижчого рівня, які в цілому можуть бути використані у WSN.

Таблиця 1.7. Можливі протоколи WSN нижнього рівня.

	GPRS/GSM 1xRTT/CDMA/LTE/ 5G NR	IEEE 802.11	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4
Ринкова назва для стандарту	2.5G/3G/4G/5G	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee
Цільова мережа	WAN/MAN	WLAN і точка доступу	PAN та DAN (Desk Area Network)	WSN
Орієнтація на застосування	Голосовий зв'язок і дані в глобальній області	Корпоративне застосування (дані та VoIP)	Заміна для кабельного підключення	Моніторинг та контроль
Пропускна здатність (Мбіт/с)	0,064 – $160 \cdot 10^3$	11-4804	1-3	0.020-0.25
Дальність передачі (метри)	Декілька кілометрів в залежності від частоти та мережі	кілька десятків метрів	1-100+	1-300+

Продовження таблиці 1.7.

Конструкційні фактори	Досяжність та якість передачі	Корпоративна підтримка, масштабованість і вартість	Ціна та простота використання	Надійність, потужність і вартість

Таким чином, з одного боку під кожну поставлену задачу необхідно використовувати індивідуальний підхід, з іншого – універсалізація може допомогти пришвидшити розгортання та зменшити собівартість системи в окремих випадках. Зрозуміло, що системи, такі, як системи моніторингу тощо, органічно мають вливатися в концепцію "розумних міст" для підвищення рівня автоматизації та покращення логістики. В основі таких процесів завжди лежить всеосяжна мережа, оскільки перш ніж речі та сенсори можуть обмінюватися даними та працювати без проблем, їм потрібна надійна мережа для функціонування. Саме тому для більшої щільності та більшої площі відстеження, вищого рівня автоматизації, універсальним підходом буде використання наявних гетерогенних мереж стільникового зв’язку, через їх досить високий відсоток зони покриття на території України [45]. Саме тому надалі в роботі розглядатимемо 5G NR, як основні та найбільш перспективні технології для бездротової передачі даних в мережах WSN.

Висновки до розділу 1

У першому розділі дослідження висвітлено різні аспекти телекомунікаційних технологій, концентруючись на енергоефективності, бездротових сенсорних мережах, було визначено поняття WSN, наведено основні характеристики, вимоги та компоненти WSN. Також розглянуто аспекти, котрі можуть пришвидшити рух у бік екологічних сенсорних мереж, із метою покращення автономності та ефективного використання ресурсів, підкреслено важливість застосування у різних сферах.

Енергоефективність інформаційно-комунікаційних технологій була визначена, як актуальне завдання, оскільки інфраструктура даних технологій досить енерговитратна. Особливий акцент робився на енергетичному споживанні та

забрудненні мережі радіо-доступу, оскільки на неї припадає відчутна частина споживання, що визначало стан індустрії. Надзвичайно важливо збільшувати відсоток енергоефективності у мережах з великою кількістю різнорідних БС, без втрат у пропускній спроможності.

Проблеми та виклики використання електроенергії в WSN визначено як ключове завдання, при цьому були виявлені проблеми, пов'язані з сенсорами, архітектурою та комунікаційною структурою. Також, бездротові радіо-інтерфейси зокрема, стандарти стільникового зв'язку та перспективи 5G NR, розглядались у контексті бездротових сенсорних систем з аналізом характеристик та архітектур найбільш вживаних технологій. Таким чином, під час реалізації систем WSN важливою складовою залишається вибір бездротового інтерфейсу. Вибір застосовуваних технологій залежить від того, яка пропускна здатність необхідна, діапазону передачі, частоти передачі, ліцензування. З точки зору бездротових сенсорних мереж, 5G NR має потенціал для покращення швидкості передачі даних, низької затримки та великої масштабованості, що робить його привабливим для використання в сучасних сенсорних мережах, однак також, як і у випадку попередніх поколінь, залишається ще важливе питання енергоефективності.

Таким чином, у розділі уточнена і сформульована науково-прикладна проблема дослідження, яка полягає у необхідності розробки нових концепцій, підходів для створення методів побудови та підвищення ефективності, енергоефективності, економічної доцільності, тощо, перспективних телекомунікаційних систем зокрема бездротових сенсорних мереж, на основі перспективних мереж 5-го покоління. Мережі 5-го покоління, можуть вирішити частину цих проблем, але через складність та неоднорідність мереж необхідно шукати універсальні підходи до поліпшення можливостей мереж радіодоступу.

РОЗДІЛ 2

2. АРХІТЕКТУРИ IOT ТА 5G NR

Важливим аспектом сучасних телекомунікаційних мереж, зокрема Інтернет, є перетворення з засобу спілкування на складну та різнобічну екосистему, яка вплетена майже у всі сфери повсякденного життя суспільства. З появою технології 5G цей процес конвергенції ще більше прискорився, надаючи користувачам швидше та надійніше підключення до Інтернету та породжуючи ряд нових та інноваційних програм і послуг. Одним із ключових впливів конвергенції мереж і послуг на Інтернет-сервіси є розширення доступності та підвищення швидкості з'єднання. Технологія 5G пропонує вищу швидкість і більшу пропускну здатність, дозволяючи користувачам оперувати медіаконтентом у режимі реального часу [46].

Підключення через мобільні мережі дозволяє досягти ключових цілей IoT, зокрема, зменшити складність та вартість пристроїв і розширити зону покриття для підтримки віддалених та складних програм. Технології бездротового зв'язку від 3GPP пропонують значущі технічні переваги, які будуть і надалі посилювати потужність інфраструктури мереж 4-го покоління, та рухатися в бік 5-го, для вирішення завдань зростаючого ринку IoT у майбутньому. Даний взаєморозвиток може привести до поширення мільярдів пристроїв та сенсорів, які надають цифрове відображення нашого реального світу за допомогою доступних пристроїв, довготривалої автономної роботи, обширного покриття і новаторських бізнес-застосунків. Важливо визначити можливості 5G для реалізації критичних додатків IoT, що вимагають динамічного керування у режимі реального часу та автоматизації в різних сферах, таких як взаємодія транспортних засобів (англ. Vehicle-to-Vehicle (V2V)), взаємодія транспортного засобу та інфраструктури (англ. Vehicle-to-Infrastructure(V2I)), управління дорожнім рухом тощо. Ключовими параметрами для забезпечення необхідної продуктивності є затримка мережі у мілісекундах та висока надійність. Обидві ці характеристики мають бути забезпечені роботою радіоінтерфейсу 5G за стандартами 3GPP. Архітектура мережі 5G спеціально розроблена для вирішення обох сценаріїв використання в Інтернеті речей [46].

З розвитком технологій дослідники [47] шукають нові варіанти архітектури IoT, котрі б розкривали всі наявні переваги нових технологій, таких як 5G-IoT, комунікація машинного типу (англ. Machine-Type Communication (MTC)), віртуалізація функцій бездротових мереж(англ. Wireless Network Function virtualization (WNFV)), бездротові мережі з програмно визначеними функціями (англ. Wireless Software Defined Networks (WSDN)), обчислення на краю мережі (англ. Mobile Edge Computing (MEC)) та мобільне хмарне обчислення (англ. Mobile Cloud Computing (MCC)). Це поєднання технологій здатне задовольнити вимоги нових застосунків. Вимоги, що висуваються до подібних архітектур – це модульність, гнучкість та масштабованість [47].

2.1 Архітектура IoT

В Інтернеті речей кожен рівень характеризується своїми функціями та пристроями, які використовуються в даному шарі. Існують різні точки зору на те, скільки рівнів має включати архітектура IoT.

2.1.1 Трирівнева архітектура

Зокрема, проаналізувавши ряд джерел [48], дослідники виділили три основні рівні, на котрих працює IoT: 1 – рівень сприйняття, 2 – рівень мережі та 3 – прикладний рівень. Дані рівні схематично окреслені на рисунку 2.1 [48].

Рівень сприйняття, також відомий як «сенсорний» рівень в IoT, призначений для отримання даних з оточуючого середовища за допомогою сенсорів та акутаторів. На цьому рівні відбувається виявлення, збір та обробка інформації, яку потім передають на мережевий рівень. Крім того, цей рівень забезпечує взаємодію між вузлами IoT у локальних мережах та мережах з малим радіусом дії [48].

Мережевий рівень в Інтернеті речей виконує функцію маршрутизації та передачі даних між різними концентраторами і пристроями IoT через мережі. На цьому рівні різні пристрої, такі як платформи хмарних обчислень, інтернет-шлюзи,

пристрої комутації та маршрутизації, використовують різні технології, такі як Wi-Fi, LTE, 5G, Bluetooth, Zigbee тощо. Мережеві шлюзи виступають посередниками між різними вузлами IoT, агрегуючи, фільтруючи та передаючи дані від різних датчиків.

Далі йде прикладний рівень. Прикладний рівень гарантує аутентифікацію, цілісність та конфіденційність даних. На цьому рівні реалізуються цілі IoT або досягається створення розумного середовища.

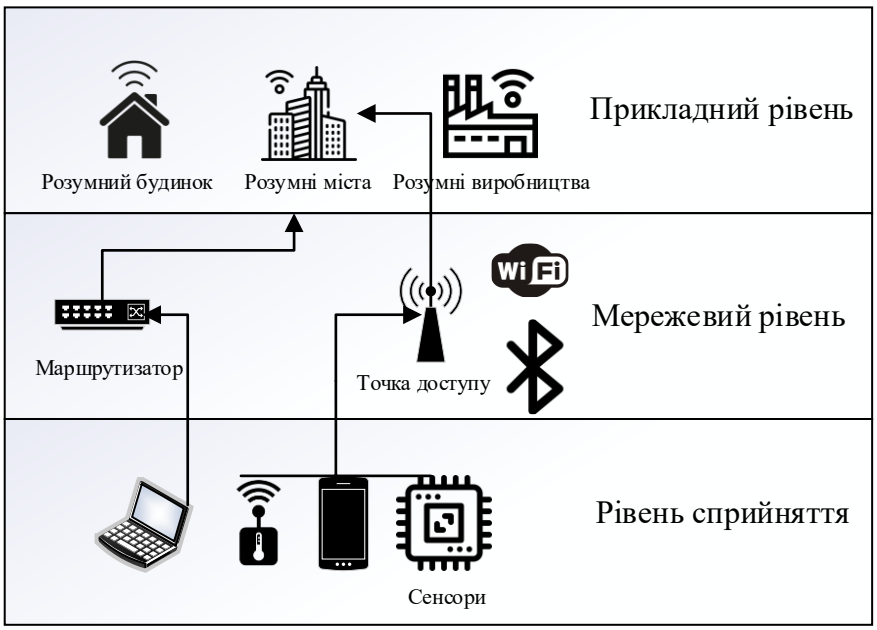


Рисунок 2.1. Трирівнева архітектура. IoT [48].

2.1.2 Архітектура на основі програмно-конфігурованої мережі

Впровадження Інтернету речей у реальному світі характеризується великою різноманітністю (гетерогенністю). Така різноманітність часто виникає через інтеграцію вже існуючих, незалежно розгорнутих підмереж Інтернету речей, які відрізняються за набором пристроїв та можливостями підключення. Різноманітність різних типів мережевих технологій пояснюється історією розвитку технологій та їхньою різною спеціалізацією в різних підгалузях [49].

Застосовуючи підхід, у якому рівень управління мережею відділений від пристроїв передачі даних і реалізується програмно, дослідники [49] ставили за мету

вирішити проблеми: спільного використання мережевих та сенсорних ресурсів; сумісності, яка виникає, коли різнорідні пристрої використовують різні формати даних для моделювання інформації та різноманітні протоколи для міжмашинного (англ. Machine-to-Machine (M2M)) обміну даними. Розглядаючи різні реалізації мереж з програмно визначеними функціями (англ. Software Defined Networking (SDN)), автори [49] запропонували контроллер для мультимережевого IoT та подали бачення такої архітектури в чотирьох рівнях абстракції.

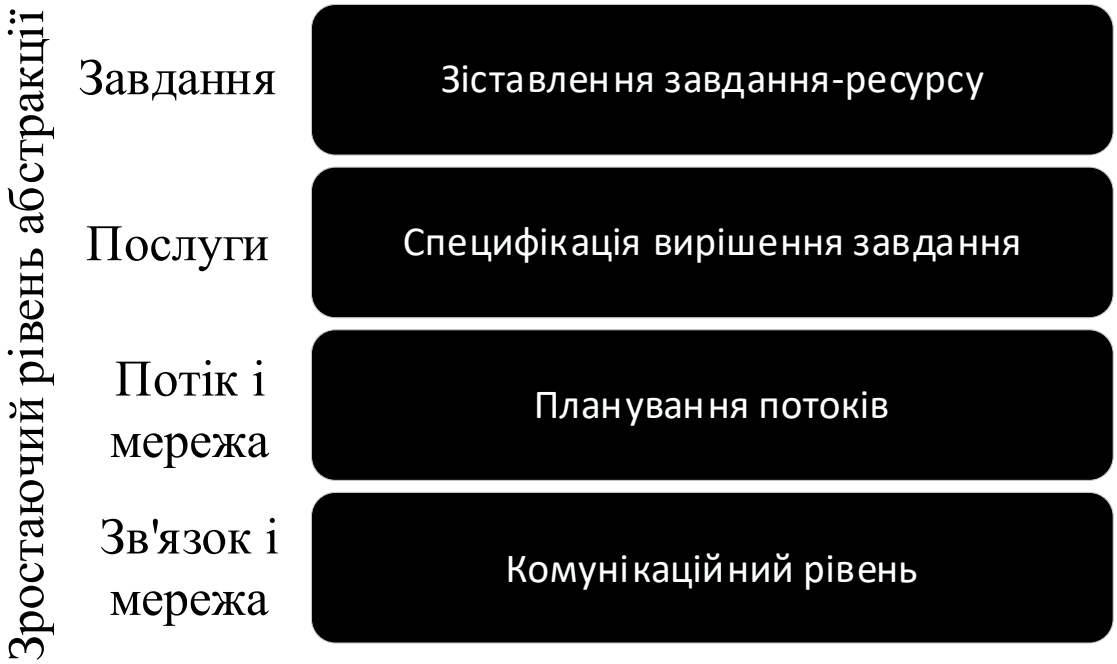


Рисунок 2.2. Рівні мультимережевого IoT[49].

Насамперед, описується, що завдання (постановка задачі) є найвищим рівнем абстракцій у мультимережах IoT (рис. 2.2), визначає потреби і залишає відкритим вибір, які програми/послуги, пристрої та комунікаційні мережі слід використовувати для виконання цього завдання. Як приклад наводиться завдання по визначенню кількості транспортних засобів на станції підзарядки. Наступний рівень – сервіси, що представляють собою конкретні програмні або апаратні об’єкти, які сприяють реалізації завдання. Завдання може бути виконане одним сервісом, наприклад,

зйомкою відео з зарядної станції, або комбінацією робочих процесів служб, які разом реалізують завдання, наприклад, зйомкою відео та підрахунком транспортних засобів. Подальше відображення завдань та сервісів визначає, які пристрої та програми слід використовувати для виконання завдання(наприклад конкретні вимоги до пристроїв, пропускну здатність). Рівні потоку та мережі на нижньому рівні вирішують, які мережі слід використовувати для потоків додатків(applications) і як потоки додатків(applications) мають бути маршрутизовані в мережах. Ці рішення будуть передані на відповідні пристрої через рівень зв'язку та керування [49].

Таки чином архітектура на основі SDN для IoT призначена для забезпечення високого рівня якості обслуговування для різних завдань IoT у гетерогенних середовищах бездротової мережі.

2.1.3 Восьмирівнева архітектура 5G-IoT

Автори [47], аналізуючи ряд досліджень та архітектур, беручи до уваги ряд технологій, зокрема 5G, що стають доступними, використовуються в інших галузях та все більше залучаються до IoT, пропонують власне бачення IoT архітектури. Описана архітектура подається, як архітектура на основі 5G з наступними характеристиками: модульність, ефективність, гнучкість, масштабованість, простота та здатність відповідати зростаючим вимогам індустрії [47].

Архітектура складається з восьми взаємопов'язаних рівнів із можливістю двостороннього обміну даними (рис. 2.3). Другий і п'ятий рівні складаються з двох і трьох підрівнів відповідно, а рівень безпеки охоплює всі інші рівні [47].

Перший рівень даної архітектури описаний як фізичний, тобто рівень пристроїв. Відповідно, до цього рівня відносять бездротові сенсори, акутатори, контролери, тобто «речі» IoT. Даний рівень є загальним та спільним рівнем для всіх варіантів компонування архітектур. На ньому мають бути використані пристрої якомога менші, що забезпечують високу обчислювальну потужність та необхідну енергоефективність енергоспоживання [47].

Другий рівень описано як рівень зв’язку. Цей шар складається з двох підрівнів: підрівня зв’язку (взаємозв’язку) між пристроями (англ. device to device(D2D)) та власне підрівня зв’язку. На першому підрівні розглядається обмін інформацією, котру генерують власне пристрої розташовані на рівні, оскільки вони містять свою власну ідентичність та індивідуальність. Тут розглядається можливість такими пристроями утворювати гетерогенну мережу, формувати кластери та взаємодіяти. Ключовими технологіями на цьому прошарку, дослідниками [47] вважаються сучасні протоколи зв’язку бездротової сенсорної мережі, mmWave та 5G-Plus-HetNet, завдяки підтримці високої швидкості передачі даних та інших особливостей МТС. Підрівень зв'язку – на цьому підрівні пристрої підключаються до точок комунікації, таких як базові станції тощо, також передбачена можливість надсилати та аналізувати власні дані через підключення до внутрішньої мережі та пристроїв зберігання даних [47].

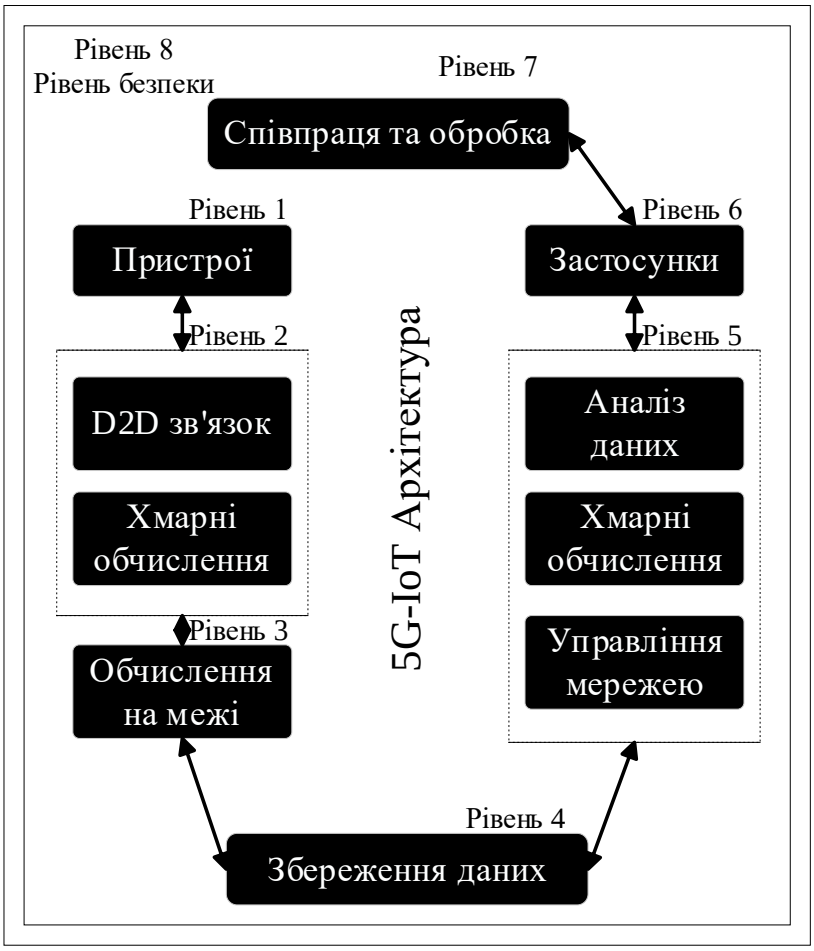


Рисунок 2.3. Восьмирівнева архітектура 5G-IoT [47].

Третій рівень, рівень туманних обчислень. На цьому рівні вузли обробляють дані для прийняття рішень на рівні «краю» (англ. Edge). Завдяки технології 5G та розвитку мобільних пристроїв, таких як смартфони, технологія багатошарового крайового обчислення (англ. Multi-Access Edge Computing(MEC)) стає більш потужною для вирішення викликів і вносить значний внесок на цьому етапі [2].

MEC – це концепція обчислення на краю (англ. Edge Computing), яка передбачає розміщення обчислювальних ресурсів і сервісів ближче до кінцевих пристроїв і користувачів, на межі мережі (на рівні доступу). MEC дозволяє обробку даних та виконання завдань прямо на крайових вузлах мережі, замість централізованого обчислення на віддалених серверах.

Далі йде рівень зберігання даних. На цьому рівні розташовані блоки для зберігання оброблених та необроблених (англ. raw) даних, отриманих від зовнішніх фізичних пристроїв. Цей рівень вимагає особливих заходів забезпечення безпеки та має відповідати великому обсягу даних і трафіку, що передбачається для майбутніх програм.

П’ятий рівень, зазначений як рівень управління службами, розбитий у свою чергу на три підшари, описаних нижче [47]:

- підрівень керування мережею. Управління мережею включає в себе зміну типу зв'язку між пристроями та центрами обробки даних. Ключовою технологією на цьому рівні є WNFV, яка дозволяє оновлювати топологію мережі та типи протоколів зв'язку, такі як 5G-IoT або ZigBee, для поліпшення якості структури IoT. Іншою корисною технологією є WSDN, яка управляє мережею IoT та дозволяє змінювати конфігурацію мережі для підвищення продуктивності;
- підрівень хмарних обчислень. На цьому рівні дані з периферійних обчислень повторно обробляються в хмарі для отримання остаточної обробленої інформації. Завдяки технології 5G мобільні пристрої можуть виконувати цей тип обчислень в режимі реального часу, що робить систему IoT більш ефективною, стабільною, масштабованою та швидкою;
- підрівень аналізу даних. На цьому рівні використовуються нові методи аналізу даних для створення цінності із вихідних даних. Покращення алгоритмів

великих даних буде сприяти обробці даних на цьому рівні, особливо при зростанні обсягу інформації завдяки інтеграції 5G та IoT.

Прикладний рівень. На цьому рівні програмне забезпечення взаємодіє з попередніми рівнями та даними, які перебувають у "стані спокою", тому не потрібно працювати зі швидкістю мережі. Застосунки можуть революціонізувати бізнес-потреби, контролюючи додатки, бізнес-інтелект та аналітику. Фактично, прикладний рівень дозволяє бізнесам та людям робити правильні рішення в правильний час з правильними даними.

Сьомий рівень, взаємодії та обробки. Система IoT та інформація, що надходить з попередніх рівнів, не приносять користі, якщо не призводять до конкретних дій. Додатки, які реалізують бізнес-логіку, надають нові можливості користувачам. Люди використовують програми та пов'язані з ними дані для своїх потреб. Часом кілька осіб використовують одну програму для різних цілей. Користувачі повинні мати можливість співпрацювати та взаємодіяти[47].

Як заключний, восьмий рівень, це рівень безпеки. Охоплює та захищає всі попередні шари, але кожен розділ (точка перетину цього шару з іншим) має власну функціональність. Рівень безпеки запропонованої архітектури передбачає різні терміни функцій безпеки, включаючи шифрування даних, автентифікацію користувачів, контроль доступу до мережі та безпеку в хмарі, тощо[47].

Отже архітектура IoT, зокрема з використанням технології 5G може зводитися до кількох рівнів та компонентів для забезпечення ефективного збору, обробки та обміну даними. Підсумовуючи описане в джерелах, можна виділити такі ключові шари, що забезпечать необхідний функціонал мережі:

- Рівень Сприйняття (англ. Perception Level).На цьому рівні розташовані сенсори, які збирають дані з навколишнього середовища, і приводи, які можуть впливати на нього.Сенсори можуть мати можливість проводити локальні обчислення для передпопередження надлишкового обсягу даних, що передаються в мережу.
- Рівень Мережі (англ. Network Level). Використовуються технології 5G, зокрема використання високих частот, для швидкої передачі даних. Також, платформи хмарних обчислень можуть використовуватися для обробки та аналізу

великих обсягів даних, що зібрані сенсорами. На цьому ж рівні використовуються мережеві шлюзи, що служать посередниками між сенсорами та хмарними платформами, забезпечуючи агрегацію та передачу даних;

- рівень застосування (англ. Application Level). Тут розташовані конкретні програмні та апаратні рішення для реалізації конкретних завдань. Важливий рівень, який забезпечує інтеграцію IoT вузлів у різні прикладні-процеси;
- Інтернет Речей (англ. Internet of Things). Рівень забезпечує можливість взаємодії між різними IoT-пристроями та системами. Архітектура повинна бути розроблена з урахуванням масштабованості та гнучкості для підтримки росту кількості пристроїв та різноманітних додатків;
- рівень безпеки. Включає в себе заходи безпеки, такі як шифрування, аутентифікацію та авторизацію для захисту даних.

2.2 Архітектура 5G NR

Під п’ятим поколінням у телекомунікаційній індустрії мають на увазі технології, що належать до 5G New Radio (NR). NR розглядається, як набір технологій від фізичного рівня радіодоступу в мережу до ядра мережі. Кількість абонентів у мережах 5G постійно зростає та мала досягти понад мільярд користувачів до кінця 2022 року та має наблизитися до п’яти у 2028-му році (рис 2.4) [50].

Мобільні мережі 5G NR відрізняються від попередніх поколінь тим, що забезпечують наднадійний зв’язок із малою затримкою, уможливлюють зв’язок машинного типу, а також включають розширений мобільний широкосмуговий зв’язок. Ці три головні аспекти формують основу варіантів використання та сфери застосування. 5G також відзначається високою пропускною здатністю, що дозволяє обробляти величезні обсяги даних, і вбудованою підтримкою інтернету речей, що розширює можливості підключення різноманітних пристроїв у реальному часі. Впровадження мобільних мереж 5G відкриває нові перспективи для розвитку технологій та сприяє створенню інноваційних рішень у багатьох галузях.

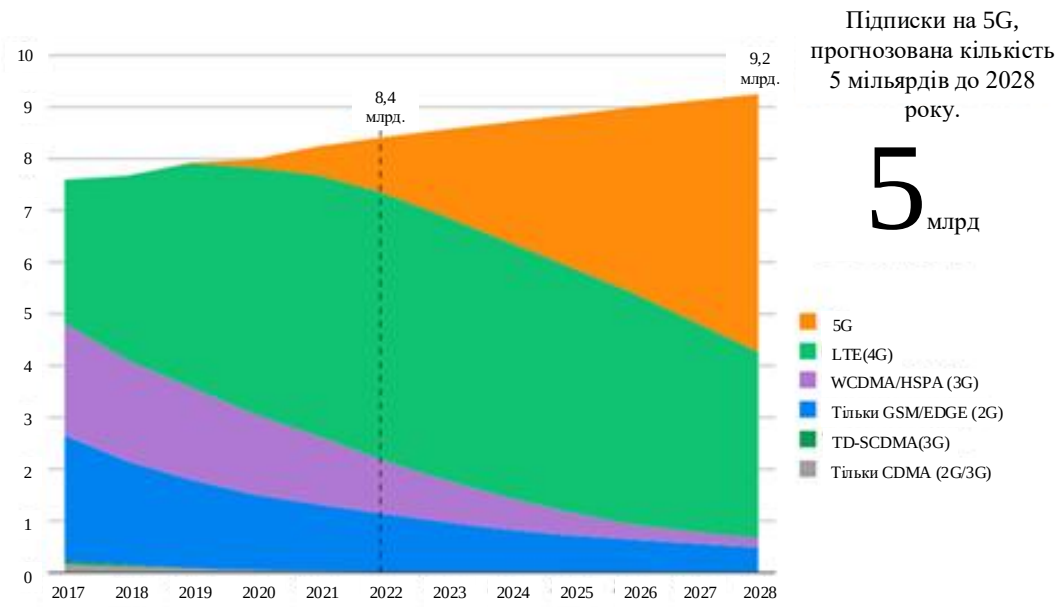


Рисунок 2.4. Кількість користувачів у залежності від технології стільникового зв’язку, що використовується [50].

2.2.1 Можливі сценарії використання 5G NR

Інновації, які має привнести 5G в бездротові технології, були визначені в трьох широких категоріях у рамках проекту 3GPP SMARTER (Study on New Services and Markets Technology Enablers)[40]: вдосконалений мобільний широкосмуговий зв’язок (англ. enhanced Mobile Broadband (eMBB)), масовий зв’язок машинного типу (англ. massive Machine Type Communications (mMTC)), та ультранадійний зв’язок із низькою затримкою (англ. Ultra-Reliable Low Latency Communications(URLLC))(рис. 2.5) [51].

Удосконалений мобільний широкосмуговий зв’язок (eMBB) передбачає різні сценарії доступу до сервісів, даних та мультимедійного контенту. До eMBB висуваються вимоги щодо високих швидкостей передачі даних, збільшення трафіку, щільності абонентів та їх висока мобільність. Пропонуються різні сценарії розгортання та покриття, що стосуються різних зон обслуговування, наприклад, у приміщенні чи назовні, у міських, сільських районах, офісі та вдома, підключення до

локальних і великих зон, а також спеціальні розгортання (наприклад, масові зібрання, трансляції, житлові та високошвидкісні мережі, транспортні засоби) (табл. 1.9) [41].

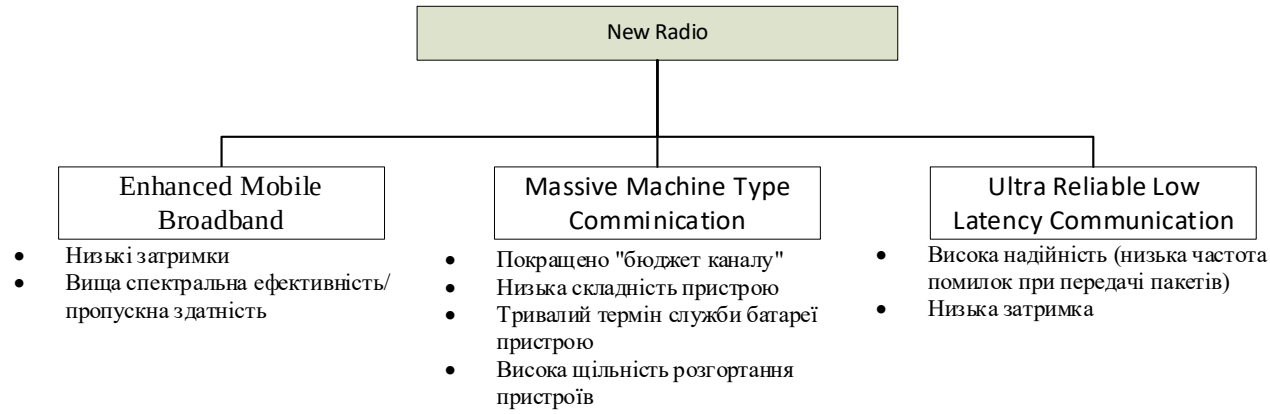


Рисунок 2.5. Три основні сценарії використання технологій 5G NR

Ультранадійний зв’язок із низькою затримкою (URLCC). Деякі сфери застосування вимагають від технології стійкості, високої доступності послуги зв’язку та дуже низьких затримок, що зумовлено використанням у критичній інфраструктурі та промисловій автоматизації. У цілому, загальна затримка в обслуговуванні залежать від затримки на радіоінтерфейсі, передачі в мережі 5G, передачі на сервер, що може бути поза мережею та центру обробки даних. Таким чином, деякі фактори залежать безпосередньо від системи, а решту можна зменшити за допомогою покращення взаємодії мережі 5G з сервісами за її межами, наприклад, за рахунок локального хостингу служб. У рамках автоматизації процесів та дистанційного керування очікується отримати надійність 99,999%, при швидкостях передачі даних користувача до 100 (Мбіт/с) та затримкою 50 (мс), цього можна досягти завдяки обрахункам на «кордоні мережі» (англ. Edge Computing). Прикладом автоматизації процесів може бути керування придорожньою інфраструктурою, наприклад, контролери світлофорів чи інших придорожніх пристроїв, засобів, моніторинг руху вздовж автомагістралей чи в міських районах, вулицях, за допомогою бездротового підключення до центрів контролю, керування та управління дорожнім рухом (табл.2.1) [41].

Таблиця 2.1. Приклад вимоги до продуктивності для сценарію інтелектуальної транспортної інфраструктури з бездротовим зв’язком [41].

Сценарій	Макс.дозволена наскрізна затримка	Час функціонування	Доступність послуг зв'язку	Надійність	Швидкість передачі даних користувача	Розмір корисного навантаження(корисних даних)	Щільність трафіку	Щільність з'єднання	Розмір зони обслуговування
Транспортна придорожня інфраструктура з бездротовим зв’язком	30 (мс)	100 (мс)	99.999.9 %	99.999 %	10 (Мбіт/с)	Від малого до великого	10 (Гбіт/с/км^2)	1,000/ (км^2)	2 кілометри вздовж дороги

Комунікації машинного типу характеризуються повністю автоматичним створенням даних, обміном, обробкою та активацією між інтелектуальними машинами без-, або з- незначним втручанням людини. Використання технологій та сценаріїв масового зв’язку машинного типу ставить за мету консолідувати всі відомі та використовувані комунікації машинного типу та пов’язані з ними служби та додатки, що може призвести до концепцій середовища розумних міст, мережевого суспільства та Інтернету всього шляхом збільшення кількості підключених до мережі інтелектуальних машин[42].

2.2.2 Варіанти розгортання архітектури 5G NR

Згідно зі специфікаціями 3GPP, розгортання 5G New Radio відбувається поетапно, та існує кілька варіантів розгортання 5G. Мережі 5-го покоління можуть бути впровадженні, як у варіант несамостійного розгортання (англ. Non-Stand Alone (NSA)) так і самостійного (англ. Stand-Alone" (SA)) [43]. Архітектура NSA означає, що мережа радіодоступу 5G (англ. 5G Access Network) з її інтерфейсом NR використовується в поєднанні з розвиненим пакетним ядром мережі EPC мереж LTE.

У такому випадку технологія NR стає доступною без повної заміни мережі. Щоправда, у такому варіанті доступні лише послуги 4G, але з використанням можливостей, які пропонує 5G New Radio, наприклад, менша затримка та вища надійність. NSA також називають «E-UTRA-NR Dual Connectivity (EN-DC)» або «Architecture Option 3» (рис. 2.6) [43].

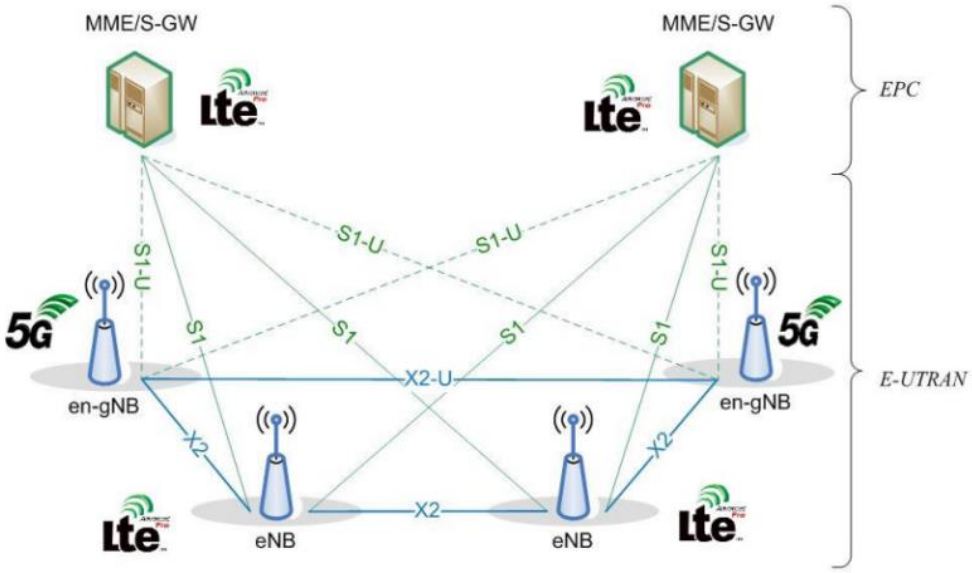


Рисунок 2.6. NSA Архітектура (3GPP) [43].

Де MME – англ. Mobility Management Entity, керує станами сесій та забезпечує аутентифікацію користувача, а також відстеження користувача в мережі; S-GW – Serving Gateway, основна функція «Сервісного Шлюзу» полягає в маршрутизації та пересиланні користувацьких пакетів даних; E-UTRAN – англ. Evolved Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) Terrestrial Radio Access; eNB – англ. E-UTRAN Node B) або англ. Evolved Node B, тобто базові станції що можуть працювати в мережах стандарту LTE; en-gNB – en-gNB представляє gNB, який може з'єднуватися з EPC та eNB; gNB – gNodeB – це 3GPP-сумісна реалізація базової станції 5G-NR; S1 – інтерфейс в LTE, який використовується між eNodeB і EPC; S1-U – інтерфейс S1 у площині користувача; X2 – інтерфейс сигналізації між eNodeB.

Натомість, в архітектурі SA, технології NR підключено до ядра мережі 5G (5G Core Network) (рис. 2.7). Тільки в цій конфігурації підтримується повний набір послуг

5G Phase 1. Архітектуру SA вже можна розглядати як «повне розгортання 5G» без потреби в будь-яких частинах мережі 4G для функціонування [43].

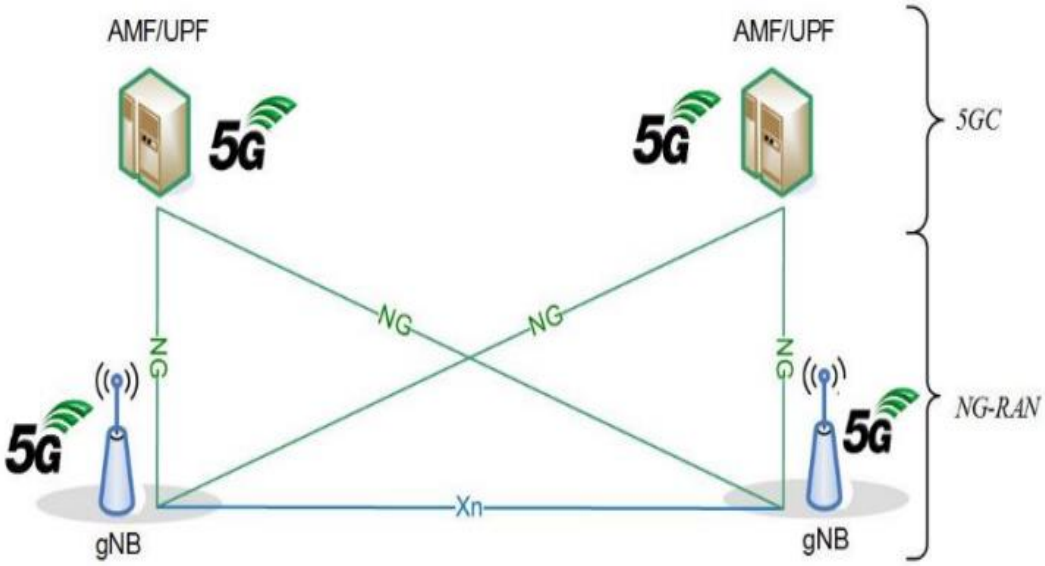


Рисунок 2.7. SA Архітектура (3GPP) [43].

Де AMF – функція управління доступом і мобільністю; UPF – функція площини користувача; gNB – gNodeB є реалізацією базової станції в 5G-NR; NG – інтерфейс, який існує між 5GC і базовими станціями; Xn – інтерфейс визначено між двома вузлами NG-RAN.

При таких сценаріях розгортання може бути шість варіантів, залежно від комбінацій архітектури та функціональних потреб (рис. 2.8). Варіанти 1, 2 і 5 належать до категорії SA, а варіанти 3, 4 і 7 належать до категорії NSA [52].

Оскільки нові покоління стільникових мереж постійно розвиваються, відкриваючи нові можливості для розвитку телекомунікацій, а також загалом покращують користувацький досвід, використання стільникових мереж важливо постійно впроваджувати у практику. Зрозуміло, що залежно від початкової конфігурації вже існуючої мережі, стандарти пропонують гнучкі варіанти впровадження п’ятого покоління, щоб забезпечити максимальне перевикористання наявних ресурсів на шляху до реалізації автономної версії архітектури та впровадження повного обсягу функціональності 5G NR.

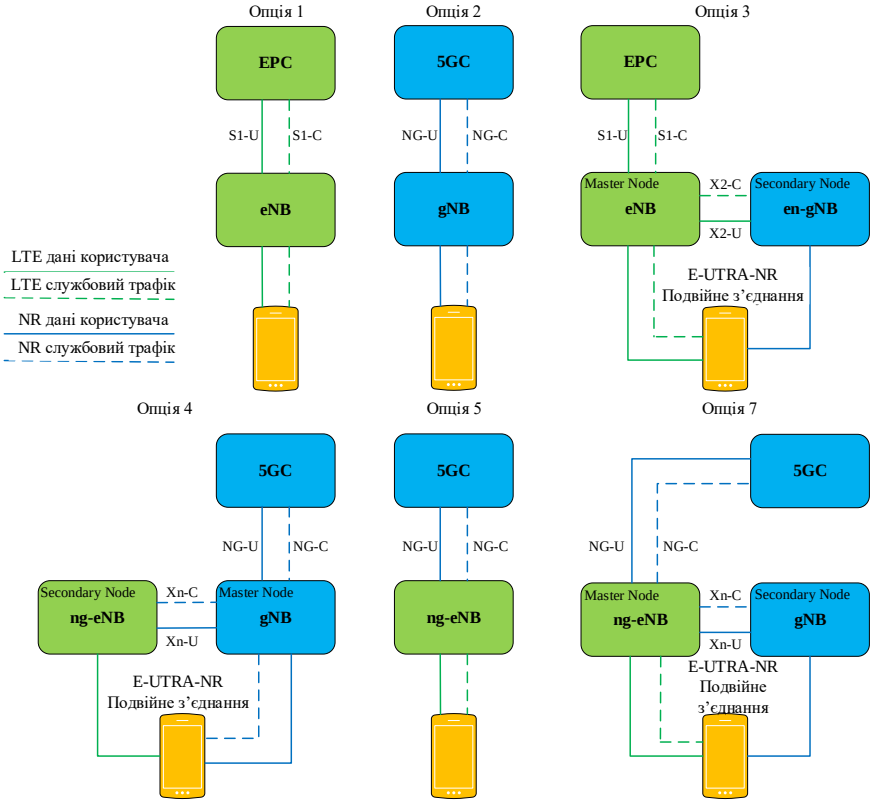


Рисунок 2.8. Шість варіантів комбінацій архітектури для розгортання NR.

2.2.3 Опис NG RAN частини

Мережу бездротового доступу до ядра (базової) стільникової мережі можна описати, як Мережа наступного покоління для радіодоступу (англ. Next Generation Radio Access Network (NG RAN)). Мережа радіодоступу наступного покоління може забезпечувати доступ як до LTE, так і NR, тому відповідно вузлом NG-RAN може бути або gNB (базова станція 5G), або ng-eNB (базова станція 4G, нового покоління). Таким чином, NG-RAN забезпечує зв'язок мобільних терміналів, резервуючи радіоресурси між терміналом та базовою станцією ng-eNB на одній носійній у варіанті LTE, чи кількох у випадку LTE-Advanced, або ж між терміналом та базовою станцією gNB, в кількох діапазонах частот 5G-NR. Базові станції ng-eNB та gNB взаємодіють між собою через інтерфейс Xn, комунікуючи з ядром мережі 5G через інтерфейс NG [53].

Отже, інтерфейс NG є перехідною точкою між NG-RAN і ядром 5G. Оскільки в мережах 5-го покоління використовують принцип розділення планів управління та

користувача (англ. Control Plane/ User Plane separation(CUPS)), тобто розділення шляхів проходження службового та корисного трафіку, то існує NG-C та NG-U. Інтерфейс NG-C, це інтерфейс між радіовузлом і сервісом, що називається функцією керування доступом і мобільністю (англ. Authentication Management Function AMF), підтримуючи передачу сигналів протоколу додатків наступного покоління (англ. Next Generation-Aplication(NG-AP)). Інтерфейс NG-U - це інтерфейс між радіовузлом і сервісом, що відповідає за функції користувача (англ. User Plane Function (UPF)), з метою тунелювання, тобто організацію передачі даних між кінцевими точками через протокол GTP-U (англ. GPRS Tunnelling Protocol - User plane) [53]. Щоб передача корисних даних відбулася, UPF налаштовується через ще один сервіс – функція управління сесіями (англ. Session Management Function(SMF)) під контролем AMF.

Таким чином, мета мобільного терміналу – обмін даними з певною кінцевою мережею (Data Network). Такий обмін відбувається через логічне з'єднання, яке називають Protocol Data Unit. Сам, так званий, логічний зв'язок, що відбувається за допомогою описаних вище елементів, розділено на дві частини. NG-RAN відповідає за з'єднання мобільного терміналу з базовою станцією, та поєднує площини керування та корисних даних з базовою мережею, а базова ж мережа 5G далі дозволяє підключити NG-RAN до потрібної DN для обміну даними, забезпечуючи при цьому моніторинг їх мобільності, гарантуючи неперервність з'єднання та певну якість QoS. Загальна схема такого підключення зображена на рисунку 2.9.

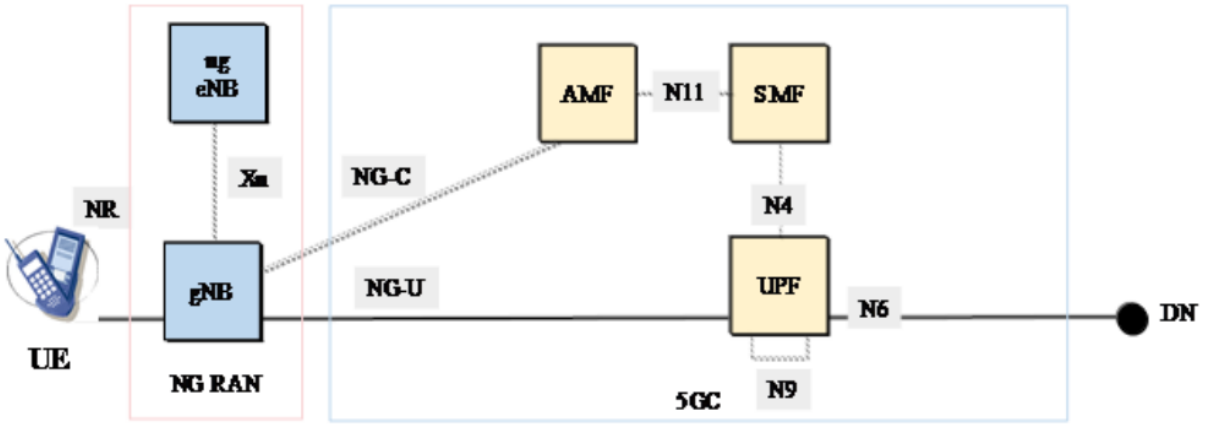


Рисунок 2.9. Загальна архітектура NG-RAN.

Архітектура протоколу радіо-інтерфейсу ділиться на два прошарки/рівні (англ. stratum) (рис 2.10). Рівень доступу (англ. Access stratum(AS)) охоплює радіоінтерфейс, забезпечуючи функціонал, пов'язаний із канальним рівнем та нижньою частиною третього рівня, відповідно до моделі OSI (англ. Open Systems Interconnection). Рівень доступу має справу з радіопротоколами інтерфейсу Uu і з протоколами, керованими через наземний інтерфейс NG. Рівень без доступу (англ. Non-Access Stratum(NAS)), відповідає за обмін даними між стільниковою та базовою мережею, а отже використовує протоколи, що дозволяють обмінюватися сигналами обладнанню користувача з об’єктом AMF 5G. На цьому рівні надаються послуги, що стосуються мобільності, автентифікації, запитів на обслуговування [53].

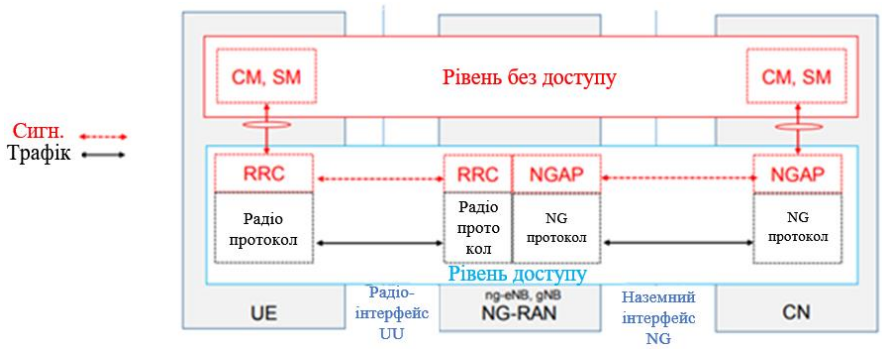


Рисунок 2.10. Протоколи в інтерфейсі 5G.

Радіоінтерфейс використовує OFDM (англ. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) модуляцію, яка відповідно складається з модуляції ортогональних піднесених (рис. 2.11).

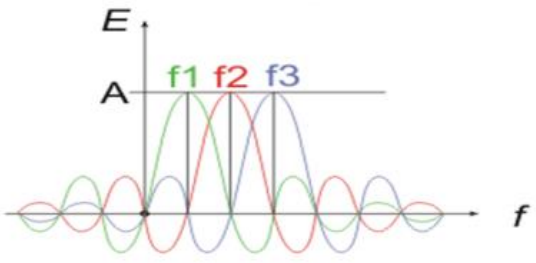


Рисунок 2.11. OFDM модуляція на трьох піднесених.

Дві піднесені будуть ортогональними тільки тоді, якщо їх скалярний добуток буде рівний нулю (2.1):

$$< c_1(t), c_2(t) >= \frac{1}{T}\int_0^T \cos(2\pi f_1 t)\cos(2\pi f_2 t)dt = 0. \qquad (2.1)$$

Тривалість символу визначається як $T = \frac{1}{\Delta f}$, де Δf інтервал піднесеної.

Ортогональна модуляція забезпечує добру спектральну ефективність та стійкість до частотноселективного завмирання в радіоканалах. OFDM сигнали використовуються в низхідних лініях, оскільки забезпечую ємність для множинного доступу (англ. Orthogonal Frequency Division Multiple Access(OFDMA)). Також завдяки техніці доповнення нулями (англ. zero-padding) вдається зменшити значення коефіцієнта середньої потужності (англ. Average Power Ratio (APR)) та розсіювання потужності на сусідні діапазони. PAPR представляє відношення максимальної потужності сигналу OFDM до середньої потужності в смузі пропускання [53].

Для передачі висхідної лінії зв'язку використовується або сигнал OFDM, або сигнал OFDM з дискретним перетворенням Фур'є (англ. Discrete Fourier Transform Spread OFDM (DFT-S-OFDM)). Сигнал DFT-S-OFDM виходить із модуляції OFDM за допомогою попереднього кодування перетворення та застосовується в ширшому діапазоні частот, ніж сигнал OFDM. Метод мультиплексування, який використовується у висхідній лінії зв'язку, – це OFDMA або одноканальний доступ з частотним розподілом в одноканальному режимі (англ. Single Carrier Frequency Division Multiple Access(SC-FDMA))[53].

Також для доступу існують такі варіанти технологій, як мультиплексування множинного доступу з просторовим розділенням (англ. Space Division Multiple Access (SDMA)), також відоме як режим передачі англ. Multi-User MIMO (MU-MIMO), що дозволяє одночасну передачу з використанням тих же частотних діапазонів для кількох користувачів. Мультиплексування SDMA вимагає використання кількох антен.

Починаючи з випуску R.16, 5G-NR пропонує мультиплексування неортогонального доступу (англ. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)), для якого частотно-часові ресурси однієї антени, використовуються одночасно кількома користувачами. За допомогою NOMA приймач встановлює архітектуру багатокористувацького виявлення (англ. Multiple User Detection(MUD), щоб усунути перешкоди від інших користувачів, за допомогою алгоритму техніки управління перешкодами (англ. Successive Interference Cancellation(SIC)). Після алгоритму SIC кожен користувач може відновити власний сигнал [53].

2.3 Розрахунок зони покриття для IoT-сервісу на базі 5G NR

Одним із поширених завдань, котре ставиться перед розробниками та дослідниками бездротових сенсорних мереж та IoT, як вже зазначалося раніше, це розгортання сервісів моніторингу, яскравим прикладом котрих можуть слугувати системи моніторингу та процесу управління транспортними засобами (ТЗ).

2.3.1 Опис системи моніторингу

Сучасні системи моніторингу, встановлені на борт ТЗ, мають забезпечувати безперервне автоматичне вимірювання заданого переліку параметрів, що можуть певним чином характеризувати стан ТЗ, з метою діагностики, прогнозування та забезпечення своєчасного ремонту, запобігання виникнення небажаних ситуацій [54].

Різні виробники, як безпосередньо транспортних засобів, так і сторонні компанії, що спеціалізуються на встановленні такого типу обладнання, пропонують різні варіації таких систем, з метою вирішення цілого ряду не тільки аспектів пов’язаних з безпекою учасників дорожнього руху, але і вирішення бізнес задач, наприклад [55]:

- ефективне та цільове використання транспортного засобу, його маршрутизація;

- підвищення організації, зменшення простоїв;
- контроль за витратою матеріально-технічного забезпечення, зокрема витрати палива;
- ідентифікація, допуск та контроль стану водія;
- контроль за датчиками, відповідальних за стан ТЗ та додаткового обладнання;
- організація диспетчеризації та оперативного оповіщення, передача тривожного сигналу у випадку надзвичайної ситуації;
- за потреби, організація двонапрямленого зв'язку з водієм.

Попри різноманіття пропонованих на ринку систем та програмних комплексів, до основних компонентів дистанційного моніторингу (рис. 2.11) можна віднести [56]:

- сенсори різного типу, встановлені з метою моніторингу різних параметрів, зокрема стану компонентів ТЗ, рівню рідин, швидкості тощо;
- модуль збору даних, завдання котрого полягає у зчитуванні та зборі даних від різних типів сенсорів з метою їх передачі модулем зв’язку;
- модуль зв’язку з бездротовою мережею, завдання котрого полягає в передачі даних з транспортних засобів на сервери, що використовуються мережею бездротового зв’язку, стільниковою мережею зв’язку або навіть супутникового зв'язку. Це дозволяє віддалено отримувати дані з транспортних засобів у реальному часі;
- сервер та програмне забезпечення, що забезпечує збір, збереження, обробку та аналіз отриманих даних, з метою генерації звітів, статистичного представлення, відображення інформації в реальному часі та формування зворотного зв’язку за потреби;
- інтерфейс користувача або мобільний додаток для взаємодії з системою моніторингу.

Це власне цілком лягає в парадигму архітектури IoT викладеної вище. Залежно від фізичної реалізації, наведені логічні компоненти можуть фізично бути об’єднані в одному пристрої.

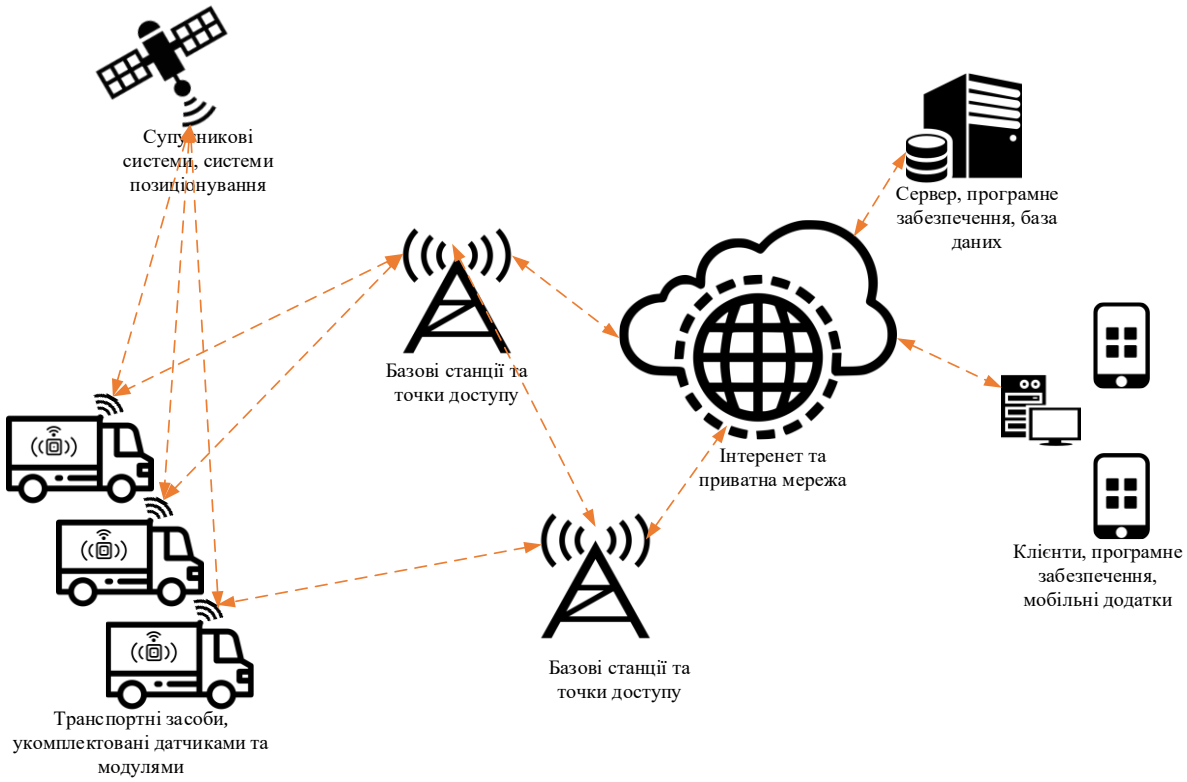


Рисунок 2.12. Загальна структурна схема компонентів системи моніторингу транспортних засобів.

Під час реалізації подібних систем важливою складовою залишається вибір бездротового інтерфейсу. Вибір застосовуваних технологій залежить від того, яка пропускна здатність необхідна, діапазону передачі, частоти передачі, ліцензування.

З одного боку, під кожну поставлену задачу по моніторингу необхідно використовувати індивідуальний підхід, з іншого, універсалізація може допомогти пришвидшити розгортання та зменшити собівартість системи в окремих випадках.

Очевидно, що подібні системи моніторингу мають органічно вливатися в концепцію «розумних міст» для підвищення рівня автоматизації та покращення логістики. В основі таких процесів завжди лежить всеосяжна мережа, оскільки перш ніж речі та сенсори можуть обмінюватися даними та працювати без проблем, їм потрібна надійна мережа для функціонування. Саме тому для більшого флоту транспортних засобів та на більшій площі відстеження, вищого рівня автоматизації, універсальним підходом буде використання наявних гетерогенних мереж

стільникового зв’язку, через їх досить високий відсоток зони покриття на території України (рис. 2.13) [57].

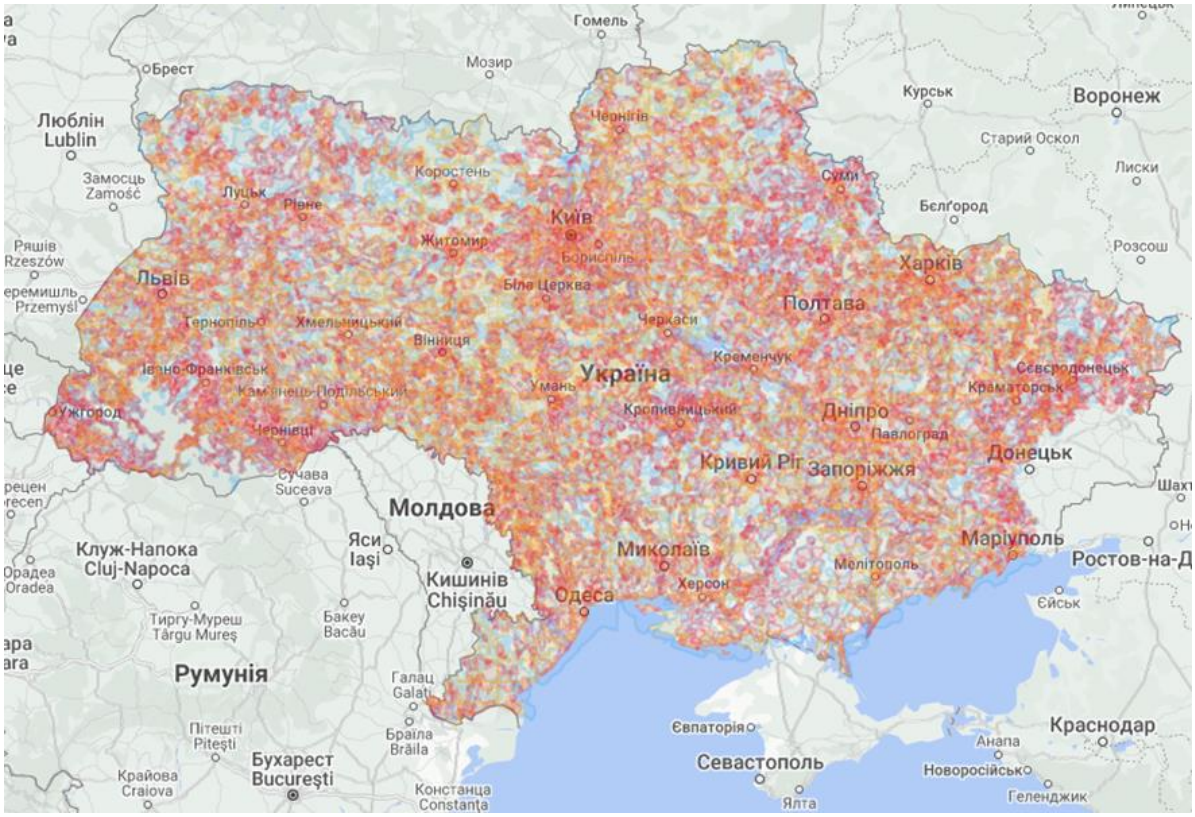


Рисунок 2.13. Зона покриття LTE в Україні трьома найбільшими операторами стільникового зв’язку [57].

У випадку моніторингу транспортних засобів та для розбудови такої сенсорної мережі, важливим є збільшення абонентської ємності, оскільки станом на 01.01.2020 згідно публічної інформації про кількість діючих ліцензій за видами діяльності на право провадження господарської діяльності з перевезення пасажирів, небезпечних вантажів та небезпечних відходів автомобільним транспортом, міжнародні перевезення пасажирів та вантажів автомобільним транспортом, кількість таких транспортних засобів становила понад 142 759 [58]. Таким чином, якщо оснащувати системами моніторингу таку кількість ТЗ, що постійно зростає, необхідно брати до уваги, що паралельно існують та користуються послугами мережі мільйони інших абонентів та пристроїв з світу IoT, зокрема за підрахунками Ерікссон (англ. Ericsson) 1,3 мільярда пристроїв, що використовують 4G/5G [50]. Також, вже у звіті від

Samsung Electronics за 2021 зазначалося, що мобільна технологія LTE, з урахуванням різноманітних послуг і вимог, які висуває сучасна індустрія мобільного зв'язку, сама по собі не здатна забезпечити необхідну пропускну здатність, затримку та надійність, з наведенням порівняння поколінь з точки зору максимальних показників (табл. 2.2.) [52].

Таблиця 2.2. Порівняння LTE та 5G.

Показник	4G	5G
Пікова швидкість передачі даних	1 (Гбіт/с) (низхідний канал)	20 (Гбіт/с)(низхідний канал)
Швидкість передачі даних користувача	10 (Мбіт/с)	100 (Мбіт/с)
Ефективність використання спектру	-	X3
Пропускна здатність	0.1 (Мбіт/м^2)	10 (Мбіт/м^2)
Затримка	10 (мс)	1,000,000/км^2
Щільність підключення	100,000/км^2	1,000,000/км^2
Енергоефективність мережі	-	X100
Мобільність	350 (км/год)	500 (км/год)
Смуга пропускання частот	Аж до 20 (МГц)	Аж до 1 (ГГц)

Саме тому, щоб запобігти перевантаженню та забезпечити необхідну ємність, можна покращувати мережу радіодоступу, важливо використовувати та рухатися у бік технологій 5G New Radio, переваги та інновації котрих було окреслено вище.

Найбільш вірогідний початковий варіант розгортання на базі вже існуючих мереж LTE, можна припустити використання одного з варіантів NSA архітектури, що дасть змогу операторам стільникового зв'язку модернізувати наявну інфраструктуру поступово [59].

У залежності від умов розгортання мережі, дослідники з Ерікссон вбачають три типові сценарії використання: сільська/приміська місцевість, міська малоповерхова забудова та щільна міська висотна забудова, що ілюструють різні аспекти

розгортання Massive MIMO, технології, що безпосередньо пов'язана з 5G NR (рис. 2.14) [60].

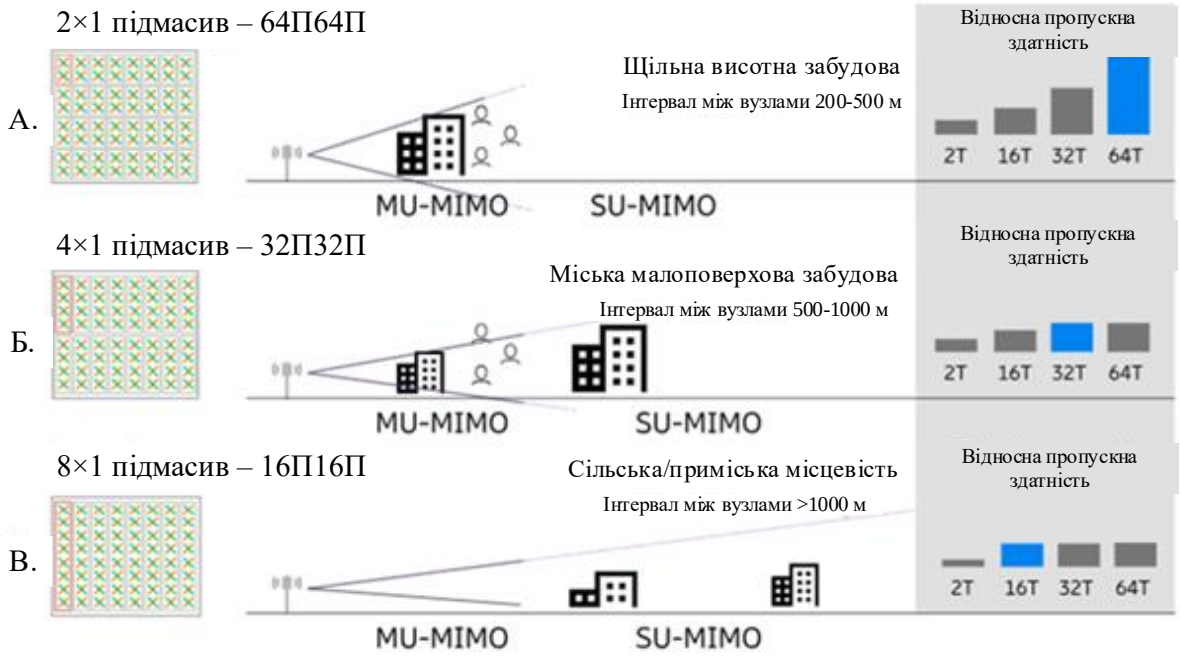


Рисунок 2.14. Приклади сценаріїв розгортання для масивів MIMO 64П64П, 32П32П і 16П16П оприлюднені Ерікссон [60].

Ключові діапазони частот, котрі заплановано використовувати під 5G в Україні, такі ж, як у Європі – 700 (МГц) і 3,4-3,8 (ГГц) [61,62], тобто належні до першого частотного діапазону FR1 відповідно до релізу 16 [53].

2.3.2 Розрахунок зони покриття для системи моніторингу

Розуміючи перспективність даних технологій, можна зробити деякі припущення, спрощення, використати наявні дані для спроби теоретичного проектування зони покриття безпровідних стільникових мереж у межах частини великої кільцевої дороги в місті Київ, котра є важливою транспортною артерією міста, на базі існуючих методичних даних для попередніх поколінь [63]. Вхідні параметри для розрахунку наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Початкові параметри теоретичної системи.

FR, (ГГц)	F, МГц	$\Delta f_к$, (МГц)	M	C	$R_{аб}$, (Мбіт/с)	Схема MIMO, k	Тип трафіку
57.00 – 71.00	2000	100	3	3	10	64	Веб-трафік

Де FR – діапазон частот, в якому працює система; F – смуга частот, виділена оператору за умовами ліцензії для розгортання системи стільникового зв'язку, МГц; $\Delta f_к$ – смуга частот одного радіоканалу (для 5G може бути аж до 100 МГц), МГц; M – кількість секторів у стільнику; C – розмірність кластера; $R_{аб}$ – гарантована абонентська швидкість, Мбіт/с; k – коефіцієнт, що враховує застосування технології MIMO;

У мережах 5G NR для підвищення ефективності та обслуговування більшої кількості користувачів можуть використовуватися антени з багатьма секторами. Типовою кількістю секторів може бути від 3 до 6 або навіть більше в залежності від конкретних умов.

У мережах 5G NR також можуть використовуватися невеликі кластери для забезпечення великої щільності базових станцій та покриття вузьких областей. Типовий розмір кластера може становити від кількох до кількох десятків базових станцій в залежності від різних факторів.

Тоді загальна кількість частотних каналів, виділених для розгортання мережі бездротового зв'язку (2.2) [63]:

$$n_k = int\left(\frac{F}{\Delta f_к}\right) = \frac{2000}{100} = 20, \quad (2.2)$$

Кількість частотних каналів для обслуговування абонентів в одному секторі одного стільника (2.3) [63]:

$$n_{чк_с} = int\left(\frac{n_k}{M \cdot C}\right) = \frac{20}{9} = 2, \quad (2.3)$$

Кількість потенційних абонентів (2.4) [63]:

$$N_A = Z \cdot \mu \cdot \rho \cdot S = 0{,}8 \cdot 0{,}5 \cdot 3097(\frac{\text{осіб}}{\text{км}^2}) \cdot 20(\text{км}^2) = 24776 \text{ (осіб)}, \quad (2.4)$$

де Z – запланована частка ринку, μ – проникнення даного типу сервісу [16], ρ – щільність населення в даному регіоні [64], S – площа території на котрій планується розгортання системи, визначмо ділянку вздовж відрізку дороги в 10 км, та зону шириною в 2 км, з переважно низько- та середньовисотною забудовою вздовж траси.

Пропускна здатність базової станції в секторі R (2.6) [63]:

$$m = k \cdot log_2 \text{M}' = 64 \cdot log_2 256 = 154, \quad (2.5)$$

де M' - кількість можливих станів модуляції.

$$R = \frac{n_{\text{чк_с}} \cdot N_{\text{рб}} \cdot n_{\text{пн}} \cdot N_{\text{сим}}^{\text{рб}} \cdot V_{\text{сс}} \cdot m}{T_{\text{рб}}} = \frac{2 \cdot 275 \cdot 12 \cdot 14 \cdot 1/3 \cdot 154}{1 \cdot 10^{-3}} = 4743{,}2 \left(\frac{\text{Мбіт}}{\text{с}}\right) = 4743 \left(\frac{\text{Мбіт}}{\text{с}}\right), \quad (2.6)$$

де, $N_{\text{рб}}$ – кількість ресурсних блоків у виділеній смузі частот радіоканалу, в даному випадку аж до 275 [53], $n_{\text{пн}}$ – кількість носійних частот в ресурсному блоці 12 [63], $N_{\text{сим}}^{\text{рб}}$ – кількість символів OFDM в часовому слоті [53], $V_{\text{сс}}$ – швидкість канального коду, m – кількість рівнів модуляції, M – кількість можливих станів модуляції, $T_{\text{рб}}$ – тривалість часового слоту, k – коефіцієнт, що враховує застосування технології MIMO.

Кількість абонентів в стільнику $N_{\text{аб_с}}$ (2.7) [63]:

$$N_{\text{аб_с}} = \frac{M \cdot R}{R_{\text{аб}}} \cdot k_{os} = \frac{3 \cdot 4743 \left(\frac{\text{Мбіт}}{\text{с}}\right)}{10 \left(\frac{\text{Мбіт}}{\text{с}}\right)} \cdot 10 = 1423(\text{осіб}), \quad (2.7)$$

де, k_{os} – коефіцієнт збільшення користувачів через конкуретність середовища(англ. oversabscription ratio) [63].

Тоді кількість базових станцій $N_{\text{БС}}$ (2.8) та радіус стільника $R_{\text{ст}}$ (2.9) [64]:

$$N_{\text{БС}} = \frac{N_A}{N_{\text{аб_с}}} = \frac{24776(\text{осіб})}{1423(\text{осіб})} = 17.4 = 18, \quad (2.8)$$

$$R_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{2 \cdot S}{3\sqrt{3} \cdot N_{\text{БС}}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 20(\text{км}^2)}{3\sqrt{3} \cdot 18}} = 0{,}65\ (\text{км}), \quad (2.9)$$

Тобто 18 пікосот можуть відповідати потребам зазначеної мережі, у випадку ж фемптосот, де радіус стільникa може бути від кількох метрів, до кількох десятків метрів, кількість базових станцій була б наступна:

$$N_{\text{БС}} = \frac{2 \cdot S}{3\sqrt{3} \cdot {R_{\text{ст}}}^2} = \frac{2 \cdot 20}{3\sqrt{3} \cdot (0.01)^2} = 770, \quad (2.10)$$

$$N_{\text{аб_с}} = \frac{N_A}{N_{\text{БС}}} = \frac{24776(\text{осіб})}{770} = 32\ (\text{осіб}), \quad (2.11)$$

З відповідною пропускною здатністю:

$$R = \frac{N_{\text{аб_с}} \cdot R_{\text{аб}}}{k_{os} \cdot M} = \frac{32 \cdot 10}{10 \cdot 3} = 11 \left(\frac{\text{Мбіт}}{\text{с}}\right). \quad (2.12)$$

Таким чином, модернізуючи мережу в межах частини траси, обмеженої середньовисотною забудовою з зазначеною густотою населення [64], включаючи можливу конкурентність середовища за допомогою 18 базових станцій, з розглянутими параметрами, з радіусом стільника в 0,650 (км) у варіанті пікосот, або 770 у варіанті фемтосот з радіусом стільника в сотню метрів, теоретично можна буде забезпечити кожного абонента гарантованою абонентською швидкістю в 10 (Мбіт/с), з метою роботи сенсорної мережі, високомобільних транзитних абонентів в межах площі 20 (км^2). Отже, в даному випадку збільшення кількості базових станцій може бути обгрунтованим для забезпечення гарантованої швидкості передачі даних та покращення якості обслуговування в умовах високої щільності населення та конкурентного середовища. Однак, потрібно також враховувати витрати на встановлення та експлуатацію мережі, а також її енергоефективність. Збільшення кількості базових станцій може також призвести до збільшення споживання електроенергії. Це може бути особливо важливим у випадку використання великої кількості мініатюрних точок доступу, таких як фемтосоти, які можуть вимагати

значно менше енергії порівняно з великими макросотами, але коли їх кількість стає дуже великою, як видно на прикладі розрахунку для фемтосот, кількість котрих для даного сценарію може становити тисячі, скажімо в сценарії радіуса стільника не сотні, а десятки метрів. Тоді загальне споживання енергії може зрости.

Висновки до розділу 2

Другий розділ присвячений розвитку ефективних та інноваційних архітектур для Інтернету речей. Окреслено перспективність використанням передових технологій, таких як 5G-IoT, MTC, WNFV, WSDN, MEC, та MCC. Наприклад, 5G-IoT може забезпечити велику пропускну здатність та низьку затримку, що робить його ідеальним кандидатом для покращення зв'язку в Інтернеті речей.

Окреслено ключові вимоги до архітектур для IoT, таких як модульність, гнучкість та масштабованість. Це свідчить про необхідність створення адаптивних та високопродуктивних архітектур, здатних враховувати широкий спектр сценаріїв використання та вимог різних застосунків IoT. На основі аналізу існуючих пропозицій стосовно архітектур (таких як трирівнева, восьмирівнева, з використанням програмно-конфігурованої мережі), виділено та описано ключові рівні для для ефективного функціонування розгортуваного сервісу. Аналіз різних варіацій архітектур сервісів IoT вказує на неоднозначність у визначенні оптимальної кількості рівнів. Це підкреслює потребу в подальших дослідженнях та розробці стандартів для ефективного IoT.

Аналіз архітектури стільникових мереж 5-го покоління, зокрема 5G NR, розширює розуміння їхнього розгортання та впливу на Інтернет речей. Розгляд різних варіантів розгортання (NSA та SA) вказує на необхідність адаптації до існуючих мереж та підготовки їх до повноцінного впровадження 5G NR.

Розрахунок зони покриття для IoT сервісу конкретизує теоретичні аспекти, показуючи, як висока густота абонентів та розгортання численних базових станцій може вплинути на складність та витрати ресурсів. Це важливо для практичного розуміння впливу архітектурних рішень на фізичне втілення та необхідність шукати універсальні підходи до поліпшення можливостей мереж радіодоступу.

РОЗДІЛ 3

3-МІЛІМЕТРОВИЙ ДІАПАЗОН ХВИЛЬ У П'ЯТОМУ ПОКОЛІННІ КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Мережі п'ятого покоління призначені для вирішення ряду викликів, що виникли у сфері телекомунікацій, особливо з урахуванням зростання кількості підключених пристроїв. Щоб відповісти на цей попит, галузь бездротового зв'язку розвиває технології стільникового зв'язку, які будуть використовувати частоти міліметрових хвиль (англ. mmWave), з метою вирішення проблем, пов'язаних із підвищенням пропускної здатності та енергоефективності телекомунікаційних систем [5][65]. Дослідники [65] на основі аналізу джерел стверджують, що при ширині каналу 1 (ГГц) на частотах 28 або 73 (ГГц) можна забезпечити передачу даних у кілька (Гбіт/с) з використанням компактних антенних решіток. Також у дослідженнях зазначається, що відповідно до IMT-2020, очікуване покращення пікової швидкості передачі до понад 10 (Гбіт/с) та 100 (Мбіт/с) швидкості передачі даних користувача, ефективного використання спектру у 3 рази, енергоефективності мережі близько 100 разів, затримки по повітрю 1 (мс), підтримки мобільності 500 (км/год) та щільності з'єднання 10^6 (одиниць/км^2). Зокрема в рамках дослідження «Beyond 5G» однією з ключових технологічних основ цього дослідження є використання діапазонів міліметрових хвиль (англ. mmWave) від 30 (ГГц) до 300 (ГГц), а також під діапазонів частот у терагерцовому діапазоні [66]. Таким чином, науковці відмічають широкий спектр можливостей, пов'язаних з передбачуваними сценаріями використання даного частотного ресурсу.

Оскільки кількість підключених сенсорних мереж та пристроїв IoT буде лише зростати, власне за оцінками Cisco більш ніж 5,7 мільярда людей матимуть мобільний зв'язок вже станом на 2023 рік, що становить більш ніж 70% від населення Землі, а кількість мобільних пристроїв зросте до 13,1 мільярда, у тому числі й кількість пристроїв у сфері M2M взаємодії [67], використання частотного ресурсу міліметрових хвиль у бездротових мережах для досягнення високих швидкостей передачі даних, є цілком обґрунтованим, оскільки збільшення швидкості передачі

даних призводить до зростання попиту на доступну смугу пропускання, кількість технічних засобів та споживану енергію.

Освоєння даного діапазону хвиль важливе також через обмеження, з якими стикаються зокрема сучасні мобільних оператори, намагаючись забезпечити роботу мультимедійних додатків для бездротових пристроїв із низькою затримкою, оскільки глобальний розподіл ширини смуги частот для всіх мобільних технологій не перевищує 780 (МГц), причому кожен основний бездротовий оператор має приблизно 200 (МГц) у всіх різних бездротових смугах частот, доступних для них [68]. Отже, головною перевагою міліметрових хвиль є наявність широкої смуги пропускання, хоча збільшення ширини може бути ускладнене шумами, що впливає на пропускну здатність телекомунікаційних систем.

3.1 Ліцензіювання міліметрового діапазону хвиль.

У багатьох країнах виділено широкі смуги спектру на частоті 60 (ГГц) для передачі даних з високою швидкістю. Однак гармонізація в даному діапазоні відсутня і виділення спектру відрізняються від країни до країни.

У Сполучених Штатах у 2001 році Федеральна комісія зв'язку (англ. Federal Communications Commission (FCC)) виділила 7 (ГГц) спектру від 57 (ГГц) до 64 (ГГц) для безліцензійного використання, неподілених на канали, що дає можливість використовувати повний обсяг 7 (ГГц) пропускної здатності, який є найбільшим блоком радіочастотного спектру в країні. В Канаді частотні діапазони гармонізовані зі Сполученими Штатами, дозволяючи використання від 57 до 64 (ГГц) для безліцензійного зв'язку. У Європі регулювання частотних діапазонів ведеться Європейська конференція поштових та телекомунікаційних адміністрацій (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT)). На відміну від Північної Америки, в Європі лише два діапазони навколо 60 (ГГц) доступні для високошвидкісного зв'язку. Один із них, 57–59 (ГГц), використовується вже багато років для різних застосувань. Другий діапазон, 64–66 (ГГц), призначений для

ліцензованих систем високощільного фіксованого сервісу зв'язку (англ. High density fixed services (HDFS)), але має більше гнучкі технічні правила, роблячи його привабливим для високошвидкісного зв'язку [69].

CEPT рекомендує розподіл частот від 57 до 64 (ГГц) для безліцензійного використання в Європі, пропонуючи два різних варіанти розміщення каналів. Ці рекомендації не обов'язкові для країн, і кожен національний регулятор може вносити свої коригування (табл. 3.1) [69].

Таблиця 3.1. Технічні характеристики для неліцензійних діапазонів у різних країнах[69].

Параметр	США	Канада	Європа	Європа	Японія	Австралія		Нова Зеландія
Всередині / Зовні	Обидва	Обидва	Обидва	Обидва	Обидва	Всередині	Зовні	Обидва
Частоти	57-64 (ГГц)	57-64 (ГГц)	64-66 (ГГц)	57-66 (ГГц)	59-66 (ГГц)	57-66 (ГГц)	59-63 (ГГц)	59-64 (ГГц)
Максимальна потужність передавача	27 (дБм) для випромінювання > 100 (МГц).	27 (дБм) для випромінювання > 100 (МГц).	35 (дБм)	10 (дБм)	10 (дБм)	13 (дБм)	13 (дБм)	27 (дБм) для випромінювання > 100 (МГц).
Максимальна ЕІВП	Середнє - 40 (дБм), пікове - 43 (дБм).	Середнє - 40 (дБм), пікове - 43 (дБм).	85 (дБм)	55 (дБм)	57 (дБм)	43 (дБм)	51.8 (дБм)	Середнє - 40 (дБм), пікове - 43 (дБм).

E-діапазон для фіксованих послуг був вперше визначений Міжнародною спілкою електрозв’язку (англ. International Telecommunication Union (ITU)) на конференції WARC-79 у 1979 році. Проте, комерційний інтерес до нього з'явився

лише наприкінці 90-х після публікації FCC у 1990-х роках дослідження використання міліметрових хвиль. Згодом, FCC в 2002 році прийняла історичне рішення відкрити E-діапазон не тільки для виключного використання урядом США, і в 2005 році була введена нова «легка ліцензійна» схема. Цей діапазон став доступним для комерційних систем зв'язку і багато країн світу приєдналися до США та Європи, відкривши його для швидких бездротових передач [70].

Розподіл частот E-діапазону складається з двох неканалізованих смуг 71-76 (ГГц) і 81-86 (ГГц) (рис 3.1). Особливість E-діапазону полягає в тому, що він не поділяється на підканали шириною не більше 50 (МГц), як це властиво нижчим мікрохвильовим діапазонам. Замість цього, його спектр поділений лише на дві смуги по 5 (ГГц) і не розподіляється далі. Це дозволяє підтримувати швидкості передачі даних у гігабіт на секунду для кожного сигналу за рахунок відносно простих системних архітектур і схем модуляції. У порівнянні з іншими мікрохвильовими діапазонами, де спектр розділяється на багато підканалів, E-діапазон забезпечує 100-кратно більший обсяг смуги для передачі [70].

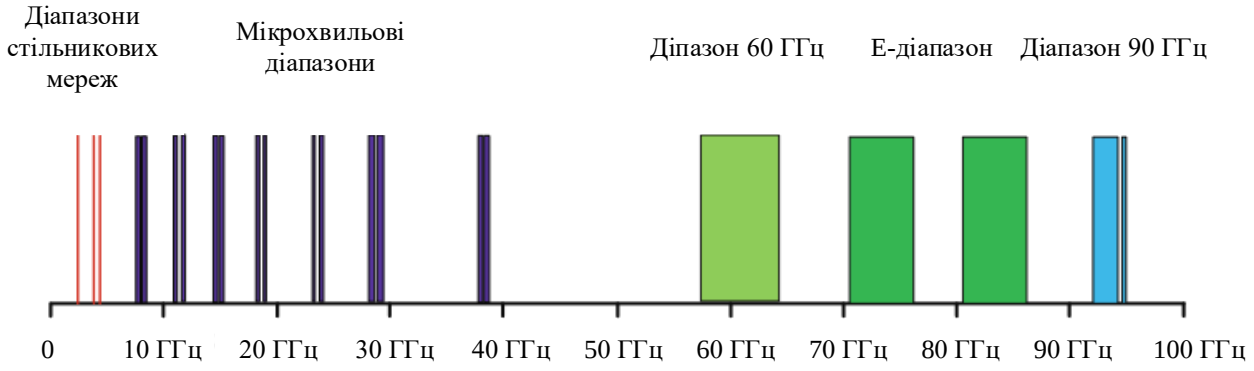


Рисунок 3.1. Розподіл частот E діапазону[70].

Таким чином, певні смуги частот вже виділено для безліцензійного використання, використання частот на рівні 60 ГГц має великий потенціал для бездротових сенсорних мереж та систем Інтернету речей. Такі системи можуть ефективно обмінюватися великими обсягами даних завдяки високій пропускній

здатності та низькій затримці передачі. Використання міліметрових хвиль на цій частоті особливо корисне для високошвидкісних бездротових мереж, зокрема для систем, які використовуються на відкритому повітрі. Особливості міліметрових хвиль на рівні 60 (ГГц), такі як висока аттенюація в атмосфері, роблять їх ідеальними для коротких відстаней передачі даних, що є важливим для систем IoT, розташованих близько один до одного. Завдяки великій аттенюації також можна створювати системи великої щільності.

3.2 Особливості поширення міліметрового діапазону хвиль

Радіоспектр до 5,8 (ГГц), використовуваний протягом минулих 100 років для бездротових комунікацій, легко поміщається в одній смузі на 60 (ГГц). Однак вище 60 (ГГц) є значна кількість доступного спектру [65]. Деякі діапазони, зокрема 183, 325 та 380 (ГГц), стикаються із значним затуханням від молекулярних резонансів компонентів атмосфери, проте існує можливість передачі інформації на короткі відстані. Деякі діапазони міліметрових хвиль мають втрати лише на 1–2 (дБ) більше, ніж при поширенні у вільному простору. Власне дощ та град викликають затухання на високих частотах, значення затухання від дощу варіюється на частотах 100–500 (ГГц). При використанні міліметрових хвиль, затухання від дощу чи снігу може бути подолане за допомогою додаткового підсилення антени або потужності передачі [65].

Особливість використання міліметрових хвиль для бездротового зв'язку полягає в тому, що при їх поширенні в атмосферних газах спостерігається приглушення потужності сигналу. Ослаблення радіочастотної енергії в атмосфері залежить від погодних умов. Згідно з дослідженням [71], поглинання терагерцового (ТГц) електромагнітного випромінювання від водяного пару, має суттєвий вплив на поширення ТГц-хвиль в атмосфері. Різноманітні технічні, комерційні та наукові застосування ТГц-випромінювання можуть бути залежні від змінної кількості водяного пару, яка змінюється в залежності від щоденної погоди, сезонних коливань, висоти і географічного положення. Зокрема, завдяки моделюванню поглинання ТГц-

випромінювання водяним паром в атмосфері, дослідникам вдалося визначити величину затухання ТГц-потужності від 100 (ГГц) до 1000 (ГГц) при різних умовах. Переважно, поглинання зумовлено ротаційними лініями води (які виникають внаслідок руху молекул води), димерами води (структурні одиниці з двох молекул води) та іншими факторами, а його величина змінюється внаслідок зміни кількості водяного пару. Додатково, дослідження враховує вплив сезонних температурних і вологісних змін, туману, пилу та дощу на затухання ТГц-випромінювання. Зазначені зміни можуть спричиняти великі коливання в поглинанні, що може сягати приблизно 60-ти разів через вплив погоди та сезонних змін у чисельності водяного пару. Важливим є визначення областей прозорості, де поглиблення ТГц-сигналу мінімальне, і вони є ключовими для певних технічних застосувань, де низька аттенюація є критичною (рис 3.2).

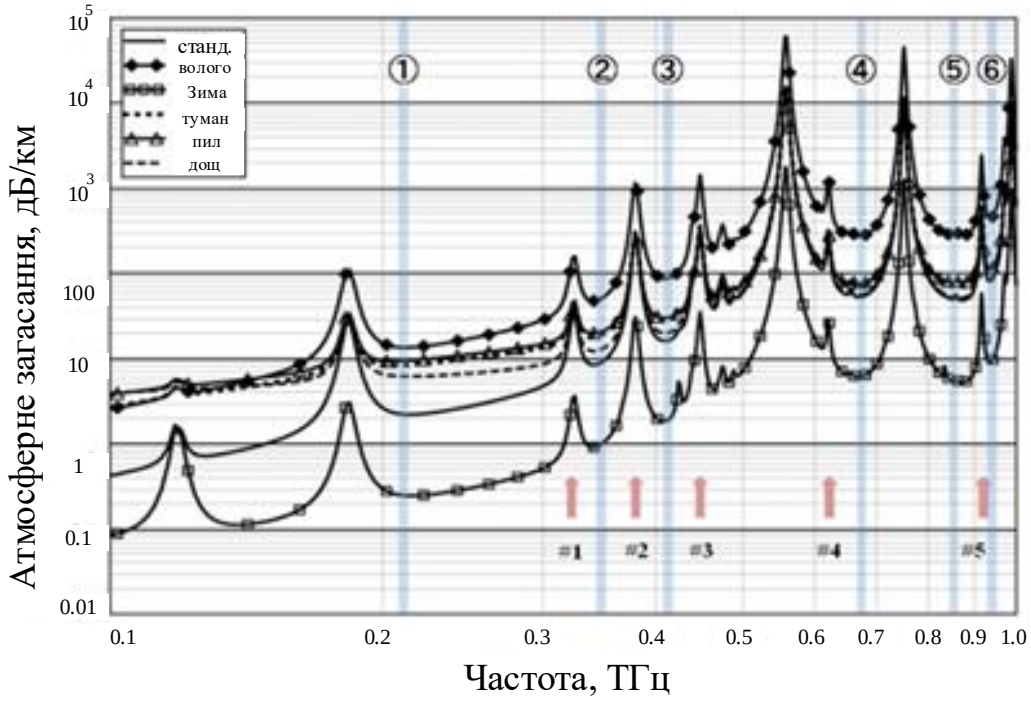


Рисунок 3.2. Атмосферне загасання на рівні моря при різних температурних умовах, відносної вологості, туману, пилу та дощу.

Де стандартна атмосфера відображала $T = 20°C$ при відносній вологості повітря 44(%); підвищена вологість повітря означала $T = 35°C$ при відносній вологості повітря 90(%); зима означала $T = 20°C$ при відносній вологості повітря 30%; туман, пил і дощ: $T = 20°C$, при відносній вологості повітря 44%. Також тут на відображенні результатів вимірювання можна спостерігати «вікна поглинання та прозорості».

Для досягнення вищої пропускної здатності в мережах, дослідники також вбачають потенціал використання радіочастотних вікон у частотному діапазоні від 200 до 300 (ГГц) (рис. 3.3), тобто діапазони частот у спектрі електромагнітних хвиль, які характеризуються зменшеним поглинанням або додатковими втратами сигналу відносно інших діапазонів частот. У цих вікнах спостерігається відносно низькі додаткові втрати через поглинання води, принаймні, можливо здійснювати передачу інформації на короткі відстані до 100 метрів [71].

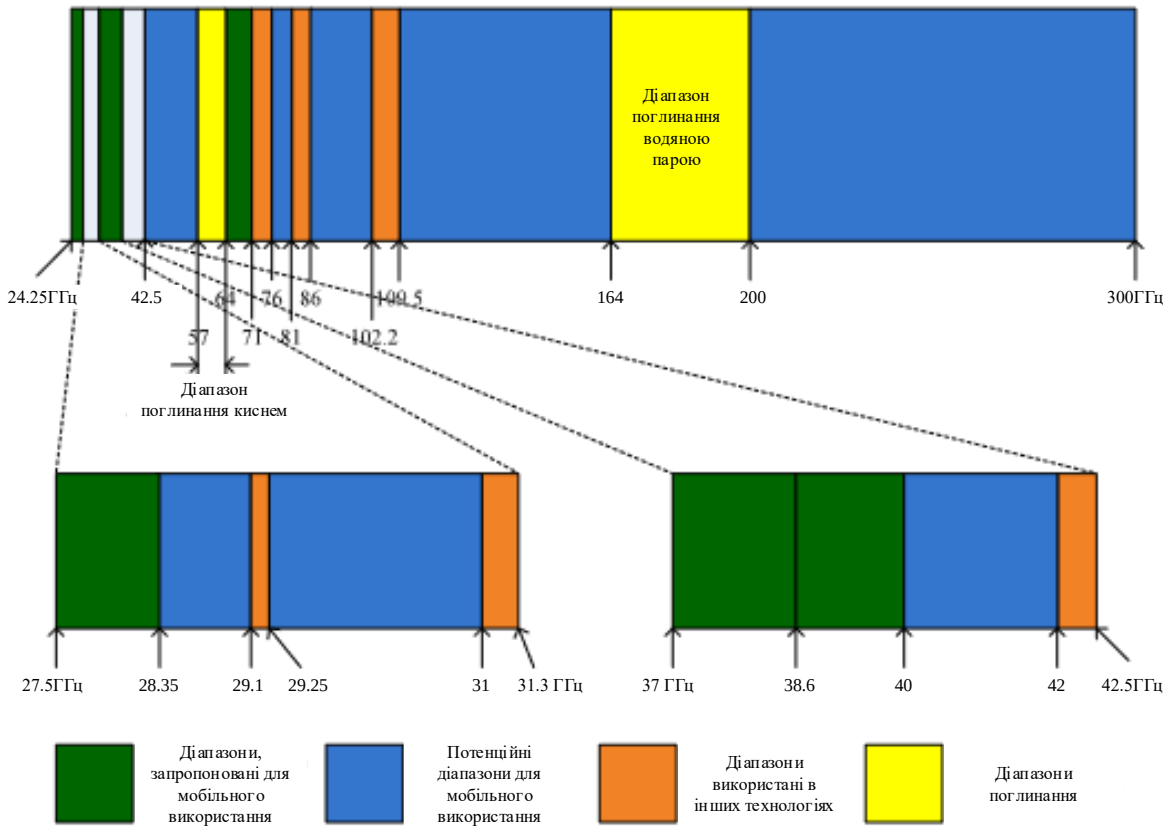


Рисунок 3.3 Використання спектру в діапазонах міліметрових хвиль [66].

Окрім стану атмосфери, як такої, під час взаємодії міліметрових хвиль з середовищами різного роду, відбуваються процеси відбивання, розсіювання, поглинання тощо. У даному напрямку постійно проводяться дослідження. Міліметрові хвилі здатні проникати через невеликі бар'єри, але не пройдуть через більшість твердих матеріалів. Втрати через відбиття і дифракцію значно залежать від властивостей матеріалів та характеристик поверхні. У різних дослідженнях наводяться приклади вимірів ослаблення для різних матеріалів, до прикладу, у [72] вимірювалися втрати на проникнення всередині та поза приміщенням на частотах 73 та 81 (ГГц), результати порівняння наведені в таблиці 3.2. Велика міра поглинання для певних матеріалів, які використовуються у будівництві, обмежує проникнення міліметрових хвиль всередину будівель, хоча деякі сигнали можуть пройти через, наприклад, скло та дерев'яні двері.

Таблиця 3.2. Втрати проникнення для будівельних матеріалів всередині та ззовні будівлі.

Частота, ГГц	Середовище	Матеріали	Товщина (см)	Отримана потужність у вільному просторі, дБ	Отримана потужність у матеріалі, дБ	Втрати проникнення, дБ
75	область поза приміщенням	Метал	4.7	-5.22	-27.91	22.69
		Затемнене скло	4.2	-6.0	-32.0	26.0
		Затемнене скло	1.2	-4.8	-9.1	4.3
	область всередині будівлі	Метал	4.5	-10.12	-26.2	16.04
		Стіна	26	-7.4	-11.42	4.02
81	область поза приміщенням	Метал	4.7	-8.2	-33.0	24.8
		Затемнене скло	4.2	-8.0	-34.5	26.5
		Затемнене скло	1.2	-6.2	-10.8	4.58

Продовження таблиці 3.2.

	область всередині будівлі	Метал	4.5	-13.2	-28.6	15.4
		Скло	26	-8.2	-12.45	4.25

Окрім вивчення різних будівельних та природних матеріалів, враховуючи що в багатьох місцевостях присутня рослинність, яка з часом може розростатися, не завжди можна забезпечити чіткий шлях для радіоканалу, тобто пряму видимість (англ. Line of Sight (LoS)). Саме тому дослідники також намагаються глибше зрозуміти вплив рослинності на ослаблення радіохвиль, щоб знаходити рішення даної проблеми [73]. Зокрема, у [73] проведено вимірювання каналів радіоспектра на несучих хвилях із частотами 2.45, 5.25, 29 та 60 (ГГц). Збір даних охопив понад 1.9 мільярда точок вимірювання потужності, еквівалентних 45 дням неперервного збору. Дослідники використовували аналізатор спектра, мультиметр та комп'ютер з GPIB (англ. General Purpose Interface Bus) інтерфейсом для вимірювання напруги, яка конвертується у значення потужності. В результаті було досліджено три варіанти каналів, що відрізнялися рослинністю на місцевості. Ділянка з листяними деревами аналізувалася в двох станах: коли дерева вкриті листям та коли листя опало. Друга ділянка мала хвойні дерева, а приймач був розташований за ними, таким чином, що майже не видно було передавача. Зокрема, в результаті експерименту було представлено залежності потужності сигналу від швидкості вітру для однотонових сигналів при 5,25 і 29 (ГГц) (рис. 3.4 та 3.5 відповідно) для першої місцевості з листяними деревами. Ці спостереження підтверджують стійку тенденцію до значної залежності передачі радіочастотної потужності від швидкості вітру при проходженні через дерева [73].

Загальний висновок з [73] полягає в тому, що характеристики ослаблення сигналу в значній мірі залежать від типу дерев та умов навколишнього середовища, зокрема від швидкості вітру. Такий аналіз є важливим для розуміння впливу природних факторів на передачу радіосигналів у змінному природному середовищі,

що є актуальним для проектування та оптимізації бездротових комунікаційних систем.

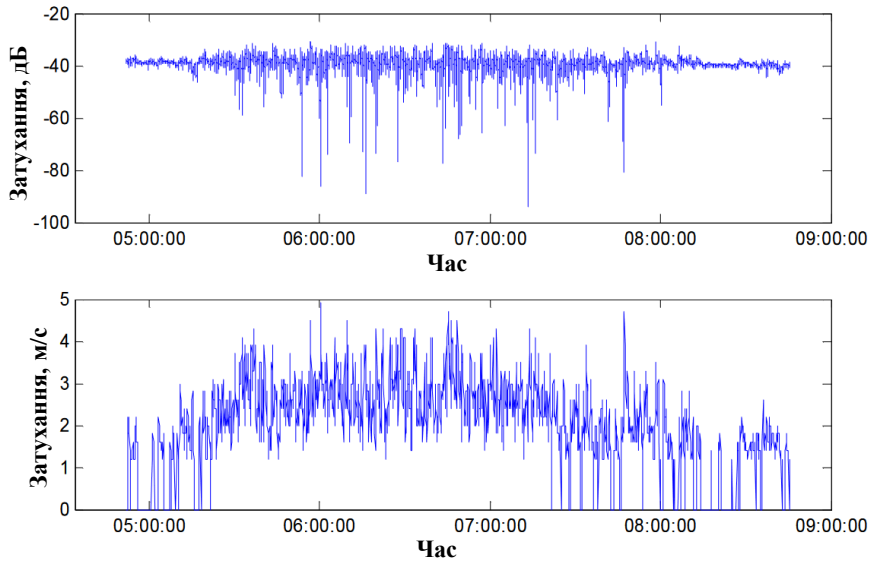


Рисунок 3.4. Залежність потужності сигналу від швидкості вітру (5,25 ГГц).

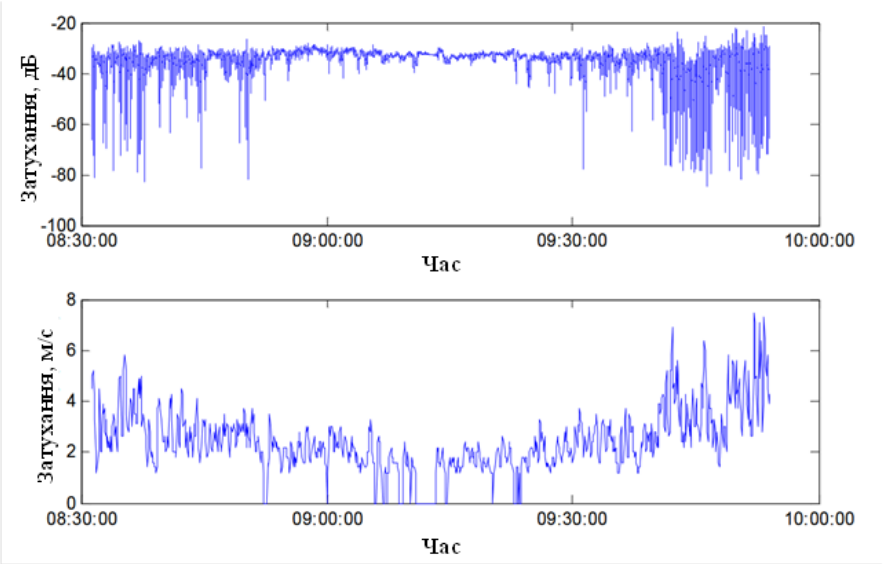


Рисунок 3.5. Залежність потужності сигналу від швидкості вітру (29 ГГц).

Отже, розуміння впливу матеріалів, рослинності, зокрема, тих, які є характерними для міської забудови, є важливим для точного моделювання каналу поширення сигналів у зовнішніх та внутрішніх системах зв'язку, з прямою та без прямої видимості.

3.3 Підходи та методи для створення моделей каналів міліметрового діапазону хвиль

При розробці систем зв’язку міліметрового діапазону хвиль, дослідники намагаються врахувати особливості дифракції, та поглинання, що значно впливають на затухання сигналу. Врахування точних моделей поширення стає критичним для розробки нових протоколів сигналізації, особливо з урахуванням низьких затримок, які прогнозуються в телекомунікаційних мережах п’ятого покоління.

Аналіз каналу зв'язку та його результат розглядаються через бюджет каналу, який формується шляхом вирахування та табулювання корисної потужності сигналу та паразитної потужності шуму в приймачі. Бюджет каналу служить для визначення балансу втрат і прибутку, розкриваючи співвідношення між ресурсами передачі та прийому, джерелами шуму, поглиначами сигналу та іншими процесами в каналі. Деякі параметри бюджету є статичними, а сам бюджет є методом оцінки, який дозволяє визначити достовірність передачі системи зв'язку [74].

Узагальнено, ефективність функціонування системи зв'язку визначається областю енергетичного покриття та пропускною здатністю каналу, яка залежить від ширини зайнятої частотної смуги та потужності передавача. Крім того, факторами, які впливають на продуктивність системи, є чутливість приймача та протяжність каналу [74].

Однією з фундаментальних властивостей передачі бездротових сигналів є швидке зменшення їх потужності на відстані. Зокрема, зазначається в [75], що у вільному просторі це явище можна описати за допомогою рівняння Фріїса, яке визначає отриману потужність сигналу (P_{RX}) на відстані d від передавача з урахуванням потужності передавача (P_{TX}). Це рівняння є важливим для розуміння зв'язку між відстанню та потужністю сигналу в бездротових комунікаціях[75]:

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2; \qquad (3.1)$$

де, P_{RX}, P_{TX} – потужності приймаючої та передавальної антени; G_{TX}, G_{RX} – коефіцієнти підсилення передавальної/ приймаючої антени; λ – довжина хвилі передаваного сигналу; d – відстань, між передавачем та приймачем.

Також, для точного проектування, порівняння радіоінтерфейсів та розгортання системи, тощо, необхідні моделі для визначення втрат сигналу. Моделі каналів є ключовим елементом при оцінці та аналізі продуктивності в системних симуляціях, особливо в міліметровому діапазоні. Для більш загальних мобільних та бездротових мереж у [66] було представлено різноманіття моделей каналів (рис 3.6),опираючись на попередні дослідні роботи, щоправда, як зазначається, деякі з цих моделей не призначені для використання у міліметровому діапазоні.

Автори [66] також описують найбільш поширені з них:

1. Модель просторового каналу 3GPP (англ. 3rd Generation Partnership), відома як SCM, була розроблена у 2003 році та призначена для підтримки шестипроменевої моделі затримки із шириною смуги 5 (МГц) у частотному діапазоні 2 (ГГц). Дана модель охоплює три різні сценарії: макростільник у міському середовищі (англ. Urban Macro; UMa), мікростільник у міському середовищі (англ. Urban Micro; UMi), макростільник у приміському середовищі (англ. Suburb Macro; SMa). До неї було розроблено розширену версію під назвою SCM-Extended, яка підтримує ще більші ширини смуги, а саме до 100 (МГц).

2. Модель WINNER I/II/+ – це проекти, які були визначені як ключові технологічні ініціативи Європейського союзу для розвитку технологій 4G в сфері мобільних мереж. У цих проектах були розроблені моделі каналів для бездротових мереж. WINNER II була розроблена для розширення сценаріїв, включаючи передачу сигналу з відкритого простору в приміщення, з приміщення на відкритий простір, а також розглядає висотні аспекти в приміщеннях. WINNER II враховує поляризацію залежно від сценарію та покращує точність для антен з крос-поляризацією. Модель WINNER+ є розширенням моделі WINNER II, що враховує ефекти тривимірного поширення. Важливо відзначити, що ці моделі є незалежними від параметрів антен, тобто їх можна використовувати з різними конфігураціями антен.

3. Тривимірна модель 3GPP. Дана модель визначена в діапазоні 2 (ГГц) із відносно малою смугою пропускання 10 (МГц). Модель об'єднує параметри для двох основних сценаріїв: UMa і UMi, охоплюючи такі середовища, як вуличні каньйони, відкриті простори, транспортні мережі, D2D, стадіони та інше. 3GPP 3D постійно вдосконалюється, а також існують модифікації, такі як 3GPP TR 38.900 для діапазону 6-100 (ГГц) і 3GPP TR 38.901 від 0,5 до 100 (ГГц).

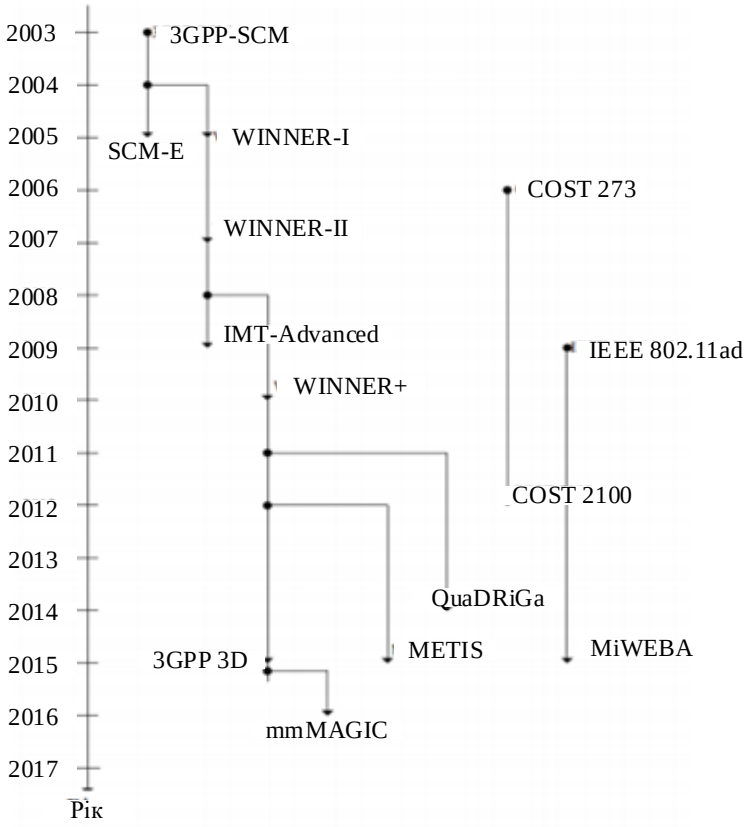


Рисунок 3.6. Доступні моделі каналів для мобільних і бездротових мереж.

4. Модель COST 273/2100 представляє собою розвиток попередньої моделі COST 259 з орієнтацією на мобільний широкосмуговий зв'язок, використовуючи технології MIMO. Основна концепція моделі заснована на концепції геометричної багатопроменевої моделі поширення в 2D середовищі. Дана концепція ефективна для збереження просторової узгодженості та дає змогу детальніше оцінювати ефективність променевого формування для MIMO та передачі між багатьма сотами.

Модель COST 2100, яка є еволюцією COST 273, використовує концепцію областей видимості (англ. Visibility Regions (VRs)), яка була введена в COST 259 для моделювання варіацій сценарію. VRs дозволяють більш практично оцінювати передачу між багатьма сотами, враховуючи видимість базових станцій з кожного кінцевого пристрою UE. Таким чином, модель COST 2100 вдосконалює оцінку ефективності системи зв'язку в умовах багатосотового середовища та різноманітних сценаріїв.

5. Модель QuaDRiGa. Відкрита реалізація тривимірної канальної моделі 3GPP, модель QuaDRiGa додатково розширена можливостями просторової послідовності (для точної оцінки ефективності масового MIMO) та багатоклітинних передач, використовує підходи моделей SCM-E та COST 273.

6. Модель IEEE 802.11ad, розроблена в 2010 році для підтримки внутрішніх близькодіючих комунікацій, наприклад, в офісах і будинках, використовує неліцензійну смугу 60 ГГц. Ця модель є квазідетермінованою, оскільки враховує ефекти відбиття сигналу (одноразові і подвійні відбиття) в тривимірних середовищах поширення. Також моделюються інші втрати сигналу, такі як блокування, на основі стохастичної геометрії. Однією з важливих особливостей цієї моделі є підтримка блокування.

7. Модель MiWEBA є розширенням моделі каналу IEEE802.11ad для використання в різних зовнішніх сценаріях, таких як доступ, зв'язок та D2D взаємодія. У моделі використовується квазідетермінований підхід, де відображені компоненти моделюються детерміновано, а інші компоненти моделюються стохастично. Це дозволяє підтримувати моделі направленого формування променю та блокування шляхів. Крім того, в MiWEBA була розроблена перша модель втрат на шляху при 60 (ГГц) в умовах UMi. Виявлено, що вплив відбитого сигналу від землі, який подорожує близько до шляху прямої видимості, є важливим для аналізу.

8. Модель IMT-Advanced. Модель складається з основного модуля та додаткового модуля (не специфічного для міліметрових хвиль), де перший ґрунтується на моделі каналу WINNER II, а останній розширює підтримку для змінних висот антен базових станцій, ширин вулиць та структур міста.

9. Модель METIS. Дана модель включає три різні підмоделі - картографічну (детерміністичну), стохастичну і гібридну. Картографічна модель використовує картографічні дані для створення моделі каналу, детерміністично визначаючи його характеристики. Стохастична модель розширює існуючі моделі для підтримки тривимірних карт, тіньових зон, параметрів міліметрових хвиль, прямого відбору потужності кутового спектру та моделей втрат сигналу, залежних від частоти. Гібридна модель об'єднує як детерміністичний, так і стохастичний підходи. На основі обширних вимірювань доступні списки параметрів каналу для діапазонів частот менше 6 (ГГц) і від 50 до 70 (ГГц).

10. Модель mmMAGIC розроблена для використання в симуляціях на рівні зв'язку та системи в широкому діапазоні частот від 6 до 100 (ГГц), для різноманітних сценаріїв. Вона базується на теоретичному підході існуючої 3D-моделі каналу 3GPP, але вносить певні покращення. Основні особливості моделі mmMAGIC включають поліпшену просторову точність для розподілу шляхів та підшляхів, реалістичний нерівномірний розподіл амплітуд підшляхів та можливість моделювання підшляхів за допомогою сферичних хвиль. Модель забезпечує стійкість у діапазоні частот від 6 до 100 (ГГц) та використовує частотно-залежні моделі антен. Також враховано неперервні зміни у часі та моделювання властивостей міліметрових хвиль, таких як випадкове блокування, кластеризація та об'єкти розсіювання. Крім того, в моделі враховано відбиття від ґрунту або підлоги.

11. 3GPP-Like 5G Mode, розроблена для зовнішнього середовища та охоплює широкий діапазон частот від 6 (ГГц) до 100 (ГГц). Для зовнішнього середовища враховані типові сценарії розгортання в міських умовах, такі як мікро- та макростільники. Модель включає базові параметри, такі як втрати сигналу, тіньове затухання, ймовірність прямої видимості, проникання та блокування для типових сценаріїв. Також враховані різні методології обробки, такі як алгоритми кластеризації та рознесення антен, що покращують точність моделювання, у внутрішньому середовищі, такому як офіси та торговельні центр. Загалом, в результаті вимірювання, автори відзначили, що менші довжини хвиль призводять до збільшеної чутливості

моделей до розміру середовища та виявляють частотну залежність втрат сигналу та збільшену ймовірність блокування.

Оскільки різноманітність досліджень виявляється у різних кількостях вимірювань та використанні різних типів антен, це може впливати на кінцеві моделі, створені на основі експериментальних даних. Із аналізованих моделей можна виділити два основних типи: імовірнісні моделі для прямої видимості (англ. LOS Probability) та моделі втрат у вільному просторі – CI модель (англ. Close-in Model). Імовірнісні моделі є ключовим елементом для прогнозування ймовірності перебування користувача в області прямої видимості (LOS) або поза нею (NLOS) через наявні завади, такі як об'єкти блокування сигналу.

Загальна тенденція полягає в розробці моделей, що краще враховують різноманітні умови та сценарії для ефективного проектування та управління бездротовими мережами.

Власне, як зазначають автори [65], для створення математичних моделей каналів міліметрового діапазону часто використовують емпіричні методи та результати вимірювань каналів, уникаючи фундаментальних фізичних підходів. Серед мотивацій вказується бажання забезпечення роботи симуляцій для застарілих систем на низьких частотах або бажання швидкої збіжності (стану, коли результати симуляцій чи моделювання виходять на стабільний та збалансований рівень), зберігаючи при цьому старі підходи. Відзначаються відмінності між моделями, що розроблені різними дослідницькими групами (рис. 3.7).

Отже, моделювання каналу для міліметрового діапазону хвиль, зокрема для технологій 5G – це постійний процес, тож роблячи висновки, можна підмітити відмінності у пропускній здатності при використанні різних моделей [65]. Розробка відповідних моделей поширення є ключовою не лише для довгострокового розвитку майбутніх бездротових систем у міліметровому діапазоні хвиль, але і для засвоєння цієї галузі інженерії майбутніми фахівцями та студентами, які будуть вивчати та розвивати індустрію мобільного зв’язку у міліметровому діапазоні хвиль. Деякі компанії вже проводять польові випробування 5G, досягаючи швидкостей передачі даних на рівні 20 (Гбіт/с) [65].

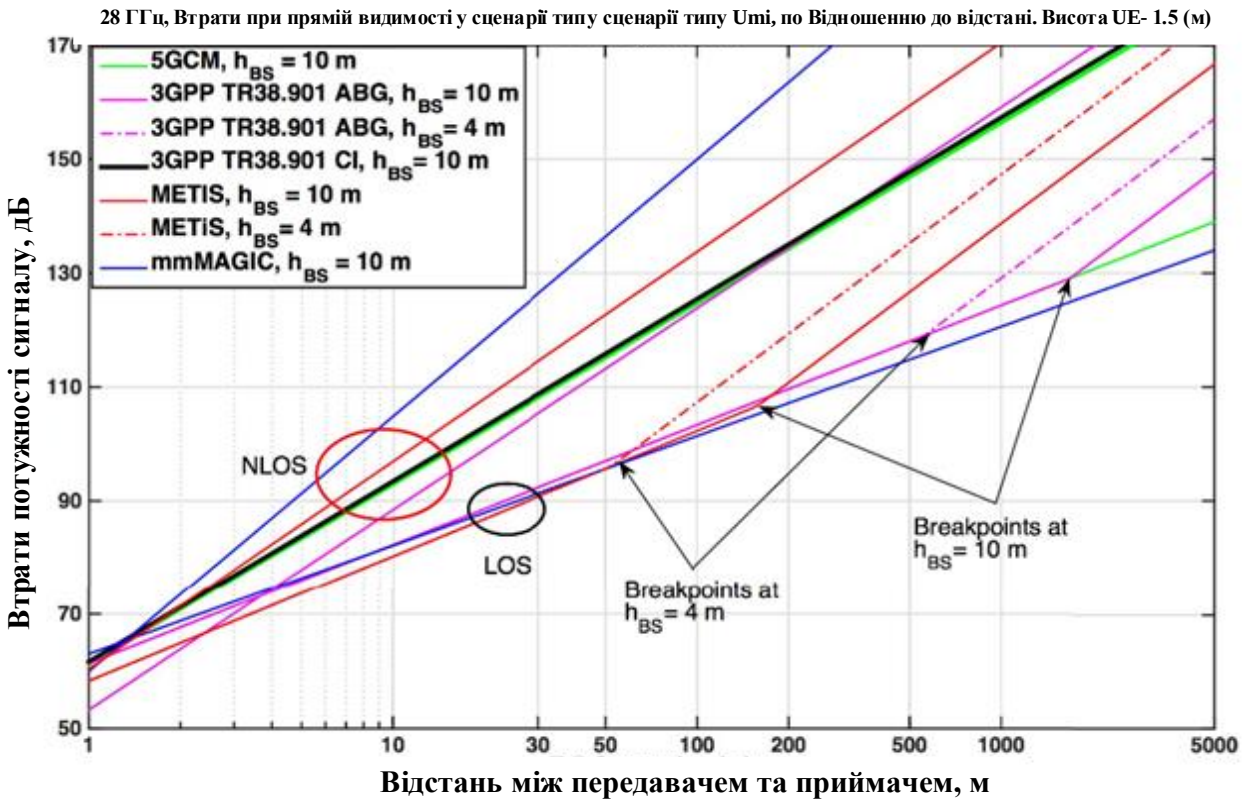


Рисунок 3.7. Порівняння втрат сигналу в залежності від відстані від передавача до приймача, для чотирьох різних моделей втрат у сценарії типу Urban Microcell.

3.4 Бюджет радіосистеми з врахуванням підсилення, аналіз дифракції поля та шуму

Аналіз шуму, втрат і затримки сигналу є ключовим для ефективної роботи систем міліметрового діапазону. На відміну від підходу для систем, які функціонують у дециметровому діапазоні, де шум визначається головним чином тепловим шумом, для даних систем важливо враховувати вплив залежності вихідної потужності від шуму і динамічного діапазону по завадам. Терміни «втрати» і «шуми» часто використовуються без чіткого розрізнення, оскільки їхні впливи на систему взаємозалежні. У зв'язку з цим важливо досліджувати обидва аспекти, оскільки вони взаємопов'язані і можуть впливати на функціонування систем у міліметровому діапазоні хвиль [74].

Для оцінки радіосистеми необхідно визначити мінімально прийнятний рівень сигналу у приймачі, що визначається як чутливість приймача:

$$P_{RXsens} = P_s(N_{int} + N_{TX} + N_{RX})/N; \quad (3.2)$$

де вираз P_s/N – співвідношення потужності несучої сигналу, до потужності шуму, необхідне для подальшої демодуляції; N_{TX} – потужність шуму джерела сигналу, охоплює не лише тепловий шум, а й інші складові, що виникають внаслідок методів генерації сигналу; N_{RX} – втрати потужності сигналу в приймачі; N_{int} – потужність перешкод від інтерференції, до складових котрої входить: $N_{int} = N_K + N_M + N_{NLOS}$, де N_K – інтерференційні завади від інших каналів зв'язку; N_M – шум, пов'язаний із молекулярним поглинанням; N_{NLOS} – зміни рівня сигналу, викликані дифракцією та відбиттями від об'єктів у міському середовищі.

Важливо враховувати розсіювання через дифузні (або множинні) відображення, молекулярне розсіювання та вплив розсіювання на турбулентності атмосфери. Шумові джерела N_M та N_{NLOS} можуть знаходитися, як власне у самому каналі, так і в інших каналах зв'язку. Відновлення сигналу відбувається ефективно, якщо його потужність на відстані d від передавальної антени, перевищує чутливість приймача (P_{RX} - P_{RXsens} > 0). Відношення сигнал/шум та інтерференційно-шумового співвідношення (англ. signal-to-interference-plus noise ratio(SINR)), яке визначає якість сигналу, можна представити у наступній формі:

$$SINR = \frac{P_{RX}}{(N_{int}+N_{TX}+N_{RX})}; \quad (3.3)$$

З урахуванням сигналу в атмосфері, що залежить від частоти несучої, гідросферних осадків та відстані між передавачем та приймачем, рівняння може набути наступного варіанту:

$$SINR = \frac{P_{TX}D_{TX}A_{RX}}{(N_{int}+N_{TX}+N_{RX})}; \quad (3.4)$$

де, D_{TX} – коефіцієнт спрямованої дії передавальної антени, A_{TX} – ефективна площа приймальної антени.

Як вже зазначалося, енергетичний потенціал радіолінії прямої видимості у радіотехніці визначається за допомогою класичного рівняння Фріїса [75]:

$$P_{RX}/P_{TX} = G_{TX}G_{RX}\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2; \quad (3.5)$$

де P_{RX}, P_{TX} – потужності приймаючої та передавальної антени; G_{TX}, G_{RX} – коефіцієнти підсилення передавальної/ приймаючої антени; λ – довжина хвилі передаваного сигналу; d – відстань, між передавачем та приймачем; $\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$ – втрати у вільному просторі.

Після представлення формули передачі Фріїса в 1946 році, вона була узагальнена багатьма способами та знайшла своє використання при дослідженні розповсюдження сигналів, формула була розширена на область Френеля, ефективності передачі енергії на короткі відстані, аналізу апертурних антен та їх характеристик, антенних масивів тощо [76]. Тож різні дослідницькі групи [65] використовують експериментальні моделі радіоканалів, які наближаються до рівняння Фріїса для створення систем мобільних телекомунікацій у частотному діапазоні від 0,5 до 100 (ГГц). У виведенні рівняння Фріїса використовується частотно-залежний вираз для ефективної площі антени. Такий підхід спрямований на розробку моделей каналів, які враховують особливості високочастотного радіочастотного спектру, для оптимального функціонування систем 5G та інших мобільних технологій.

У бездротових системах, несуча хвиля поширюється від передавача за допомогою передавальної антени, яка перетворює електричні сигнали в електромагнітні поля. У приймачі приймальна антена здійснює оборотне перетворення. При відсутності матеріальних обмежень, що відбивають або розсіюють хвилі, ці поля розповсюджуються у формі сферичних хвиль. Амплітуди цих хвиль змінюються обернено пропорційно відстані від антени. Важливо відзначити, що

напруженість поля і поляризація можуть також залежати від напряму поширення цих хвиль [74].

Для антен з параболічними дзеркальними системами в дальньому полі антена генерує сферичні поля [75]:

$$E = a_r E_0 \frac{e^{-ikr}}{r} \sqrt{D_{TX}(\alpha)}; \tag{3.6}$$

де r – радіальна відстань від антени; $\mathrm{k} = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число, для забезпечення постійної фази kr, за сферами, що центруються на антені; a_r – одиничний вектор, описує напрям поляризації електричного поля; E_0 – амплітуда напруженості електричного поля; $D_{TX}(\alpha)$ – коефіцієнт спрямованої дії антени;

Для хвильового поширення в міліметровому діапазоні та у випадку, коли антени приймача і передавача мають однакову поляризацію електричного (магнітного) поля, можна виразити наступне [77]:

$$E = a_r \sqrt{\frac{P_{TX}}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0/\mu_0}}} \frac{e^{i(\omega t - kr)}}{r} \sqrt{D_{TX}(\alpha)}; \tag{3.7}$$

$$P_{RX} = P_{TX} \frac{D_{TX}(\alpha) A_{RX}}{4\pi r^2} \approx P_{TX} \frac{A_{RX}}{\pi \alpha^2 r^2}; \tag{3.8}$$

де множник $\frac{4\pi r^2}{D_{TX}(\alpha)}$, визначає втрати сигналу, пов'язані з розбіжністю випромінювання; P_{RX} – потужність, яка надходить на вхід приймальної антени; P_{TX} – потужність, яку випромінює передавальна антена; $A_{RX} = K A_{physical}$, де $(0 < K < 1)$ – ефективна площа приймальної антени відносно фізичної площі антени.

Як зазначають автори [77], хоча в радіотехніці в певних випадках вважається, що параметри антен взаємно обернені, але у випадку для міліметрового діапазону через фізичні та технологічні особливості випромінювання, а також через вузько спрямоване випромінювання, ця умова не буде виконуватися, оскільки кут розкриття

антен міліметрового діапазону може бути частинами одного градуса. Також наголошують на тому, що не виконується співвідношення для ефективної площі антени $A = \frac{D\lambda^2}{4\pi}$, та вказується, що даний вираз виведено на основі принципів дифракції електромагнітних хвиль, ширина променю α = λ / L, де L - лінійний розмір симетричної вібраційної антени. Вираз є приблизно вірним і для дзеркальних параболічних антен [77].

У випадку використання антенних решіток апертура антени, теоретично може бути вираженою як $A = \frac{Nd^2}{4} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi}$, де N – кількість випромінюючих елементів, d – міжелементна відстань. У міліметровому діапазоні застосовуються випромінювальні елементи типу V-подібних смугових диполів і рупорні ТЕМ антени. Та все ж через велику кількість змінюваних параметрів (довжина рупора, геометрія провідника, товщина і діелектрична проникність діелектричної підкладки і т.д.) дуже складно обчислити апертуру антени міліметрового діапазону хвиль [77]. Слід врахувати, що як спрямованість, так і ефективна площа залежать від частоти (довжини хвилі) самого сигналу несучої і, отже, використання наведеного вище виразу (3.8) буде в вузькосмуговому наближенні.

У роботі [78] автори зазначають, що діапазон міліметрових хвиль з характерною довжиною від 1 до 10 (мм) і вузькими променями випромінювання сприяє зменшенню розмірів елементів антенної решітки, які випромінюють і приймають сигнали. Також це дозволяє зменшити розміри самого масиву. Тому це питання можна розглянути з точки зору методу аналізу і проектування антен та інших пристроїв, який комбінує елементи оптики та електромагнетизму. В основі цього підходу лежить ідея використання понять і методів оптики для опису розповсюдження електромагнітних хвиль. Він особливо корисний у випадках, коли розміри антени або пристрою порівнюються з довжиною хвилі, і традиційні методи електродинаміки виявляються менш ефективними або складними для використання. Власне, тому що розміри антенних решіток зменшуються, при такому підході, автори вважають, що в даному випадку також можна використовувати означений метод для

конусоподібного випромінювання антени, яка є типовою для розрахунків оптичних відкритих систем (рис 3.8):

$$P_{TX} = P_{RX} \frac{4\pi d^2 L_{atm}(f_c,d)}{D_{TX} A_{RX}}; \quad (3.9)$$

де, окрім відомих вже множників, $L_{atm}(f_c, d)$ – коефіцієнт згасання сигналу в атмосфері залежно від частоти несучої f_c;

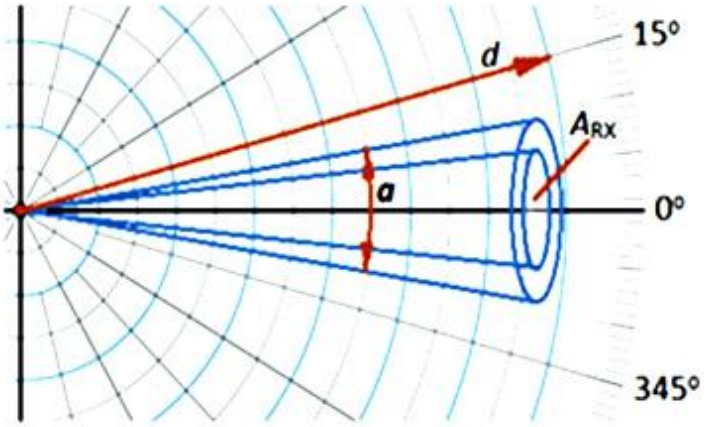


Рисунок 3.8. Модель випромінювання конусоподібної антени з використанням методів оптики.

3.4.1 Посилення та загасання сигналу міліметрового діапазону, пов'язані з явищами відбиття та дифракції.

У зв'язку із труднощами у вивченні поширення радіохвиль в міліметровому діапазоні, особливо в міських умовах, розробка точних аналітичних методів для оцінки енергетичного покриття постає досить складною задачею. Однак можна припустити, що, враховуючи характеристики просторового радіоканалу mmWave в конкретних місцевостях та його розповсюдження в заданих точках міського середовища, можливо створити енергетичну модель покриття мережі. Такий підхід базується на визначенні ймовірності створення енергетичної моделі з урахуванням

властивостей радіоканалу в певній області покриття. Аналізуючи вплив геометрії забудови на параметри радіоканалу можна зазначити, що це відкриває можливості для «підсилення» сигналу в умовах проходження через перешкоди, такі як краї будівель та їх структурні елементи. Крім того, можливі інтерференційні явища внаслідок відбиття від різних поверхонь будівель, що, в свою чергу, може сприяти підвищенню енергетичної та спектральної ефективності систем на міліметровому діапазоні хвиль.

Власне існують різні варіанти міської забудови, що можуть слугувати підсиленням сигналу у міліметровому діапазоні (рис 3.9) [77].

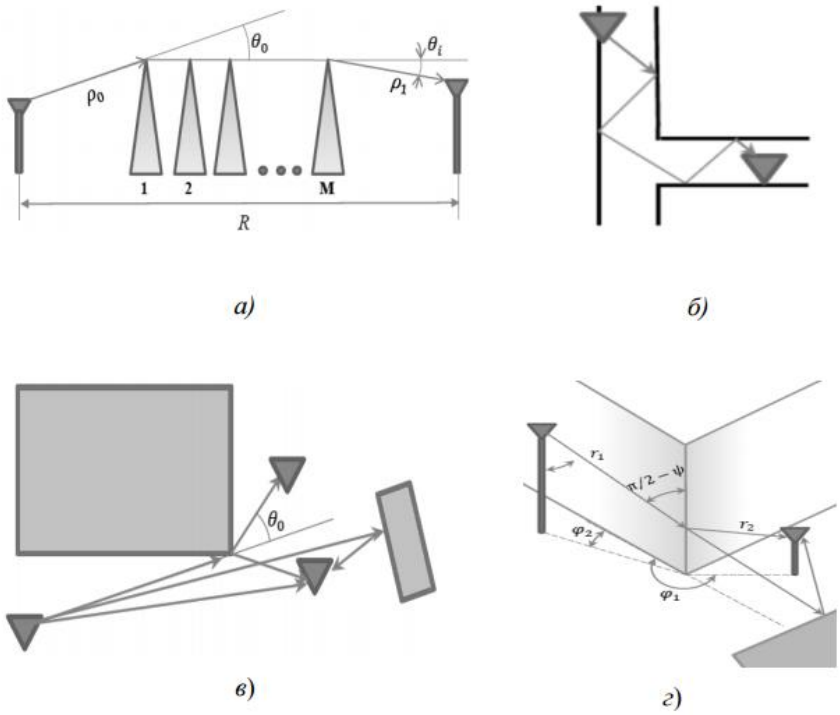


Рисунок 3.9. Варіанти результуючого посилення сигналу ММД для міської забудови: а) множинна дифракція на клинах; б) множинне відбивання; в) та г) посилення за рахунок відбивання і дифракції на прямокутних кутах [77].

У тіньових областях, коли поле дифрагує, це вносить єдиний вклад у загальне поле. Тоді, як зазначають автори [77] коефіцієнт посилення каналу, що визначається співвідношенням прийнятої та переданої потужностей, може бути обчислений на основі формули (3.8):

$$\frac{P_{RX}}{P_{TX}} = \frac{D_{TX}(\alpha)A_{RX}}{4\pi}\frac{|D(\theta)|^2}{\cos\psi}\frac{1}{r_1 r_2(r_1+r_2)}; \quad (3.10)$$

де $|D(\theta)|$ – коефіцієнт дифракції, θ, ψ – кути та $r_1 r_2$ – відстані, що визначають дифракційне посилення.

Визначити ефективне значення коефіцієнта зменшення поля при дифракції на кількох клинах однакової висоти, що визначається кількістю М, можна за допомогою спеціальної формули [77]:

$$Q_e = \frac{1}{\sqrt{\rho_0}}|D(\theta)|\frac{1}{M-1}; \quad (3.11)$$

У випадку наявності розсіювачів можуть спостерігатися різні шляхи поширення сигналу, котрий антена випромінює в різних напрямах і котрий надходить до приймальної антени з різних сторін. Для аналізу цих шляхів розрахунки проводяться окремо, але при визначенні загальної прийнятої потужності враховується когерентне додавання полів, які пройшли кожен із зазначених шляхів, з урахуванням посилення антени в різних напрямках.

Загальний бюджет радіоканалу міліметрового діапазону формується за рахунок внеску променів, які досягають приймальної антени. Під час цього процесу сигнал, що доходить до приймальної антени, зазнає втрат через ряд факторів: розбіжність випромінювання в атмосфері в зоні прямої видимості; згасання в атмосфері для різних гідрометеорів(різних атмосферних явищ, пов'язаних із вологою чи рідиною в атмосфері) в залежності від довжини хвилі [66]; згасання в зоні прямої видимості при проходженні через різні матеріали чи об'єкти (тіньовий фактор). Натомість посилення сигналу виникає через такі фактори: суперпозицію полів при відбитті (розсіюванні) випромінювання; суперпозицію полів хвиль за рахунок дифракції на елементах міської забудови; вузькоспрямоване випромінювання передавальної антени [66]; ефективну площу приймальної антени.

Тоді загальне підсилення каналу, припускаючи ігнорування змін у поляризації, є наслідком підсилення кожного променю, яке визначається умовами його поширення. Ці умови включають відбиття (перший член множника), пропускання (другий член) та дифракційне підсилення (третій член) [78]:

$$\frac{P_{RX}}{P_{TX}} = \frac{D_{TX}(\alpha)A_{RX}}{4\pi r^2} \times \sum_j \left(\prod_m p_m(\theta_j) \frac{|\Gamma_m(\theta_{mj})|^2}{\rho_m} \prod_n p_n(\theta_j) |\mathrm{T}_n(\theta_{nj})|^2 \prod_l p_l(\theta_j) \frac{|\mathrm{D}_l(\theta_{lj})|^2}{\rho_m} \right); \quad (3.12)$$

Де власне ρ_m, $\rho_l > 1$ – коефіцієнти, які вказують на надлишковий шлях променів внаслідок відбиття та дифракції; $p(\theta_j)$ – вірогідність відповідного процесу для певних умов; Г, T, D – коефіцієнти відбиття, пропускання та дифракції відповідно.

Внаслідок вузькоспрямованості випромінювання антен міліметрового діапазону і обмеженої дальності передачі (для мобільних систем), параметри *m, n* та *l* повинні мати конкретні значення, що визначаються геометрією забудови [78].

3.4.2 Розгляд дифракції міліметрових хвиль з використанням геометричної теорії дифракції

Поля, які досягають будь-якої математичної поверхні між джерелом і приймачем можна розглядати, як джерела вторинних хвиль на поверхні, що в свою чергу генерують відповідні поля. Проаналізувавши літературні джерела, автори [77] резюмують, що під час строгого аналізу дифракції на поглинаючому екрані було виявлено, що коефіцієнт дифракції однаковий для обох можливих варіантів поляризації електричного поля. Як наслідок, ортогональні поляризації не будуть змішуватися і для визначення комплексної амплітуди дифрагованого поля можна скористатися скалярним наближенням Кірхгофа. Припущення поглинаючого екрану, що є реалістичним у багатьох безпровідних каналах, дозволяє уникнути додаткової складності, необхідної для детального врахування поляризації. Дослідження дифракції для плоских хвиль на краю поглинаючого напівекрану приводять до

аналогічних результатів і при взаємодії з іншими перешкодами (клином, кутом будівлі тощо) за інших граничних умов (рис. 3.9).

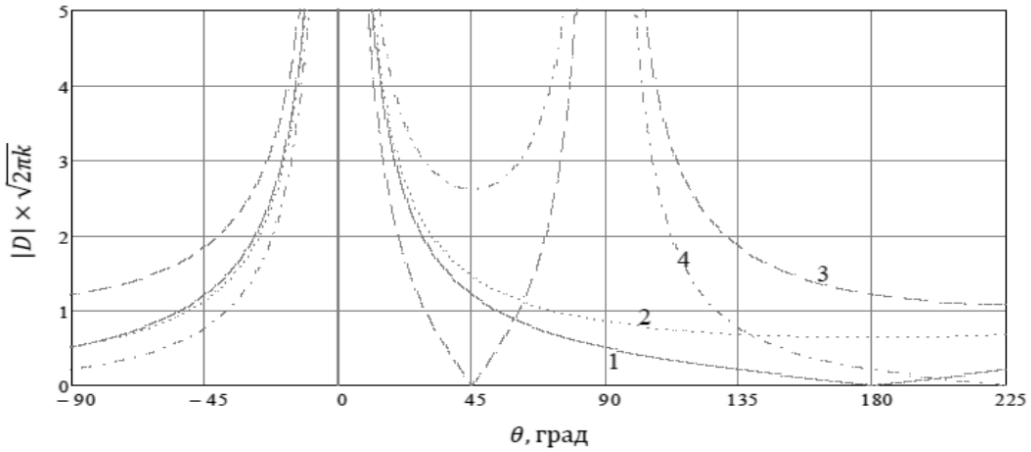


Рисунок 3.9: Порівняння моделей залежності коефіцієнтів дифракції відкута θ[77]. 1 – метод наближення Кірхгофа-Гюйгенса; 2 – модель клину з поглинаючими гранями; 3 – модель тонкого провідного екрану з поляризацією Е паралельно краю; 4 – модель тонкого провідного екрану з поляризацією Н паралельно до краю $\varphi = 45$ град.

Поле навколо конкретного променя веде себе аналогічно полю плоскої хвилі. Коли цей промінь зіштовхується з краєм, він генерує дифраговані поля, які поблизу краю аналогічні тим, які генерує падаюча плоска хвиля (рис. 3.10). На основі даних з джерел, автори [77] описують, що детальний аналіз дифракції на поглинаючому екрані за методом геометричної теорії дифракції показує, що сумарне електричне поле складається з наступних компонентів:

$$\mathrm{E}_z(x,y,0) = \mathrm{E}_0 e^{-ikx} U(\theta) + E_0 e^{-\frac{i\pi}{4}} \frac{e^{-ik\rho}}{\sqrt{\rho}} D_{UTD}(\theta); \qquad (3.13)$$

де $U(\theta)$ – функція у вигляді одиничної ступінчастої функції у першому члені вказує на наявність падаючого поля в області освітлення, $U(\theta) = 1$ (y > 0) (рис.3.10,а), але не в тіньовій області $U(\theta) \neq 1$ (y < 0); другий член представляє собою циліндричну

хвилю, яка формується внаслідок дифракції на краю, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$; $E_0 e^{-ikx}$ – хвиля, що генерується віддаленим джерелом і поширюється вздовж осі x $(z = 0)$; $D_{UTD}(\theta)$ – коефіцієнт дифракції, який визначається взаємодією прямих і дифрагованих компонентів на межі тіні, у рамках єдиної теорії дифракції [77].

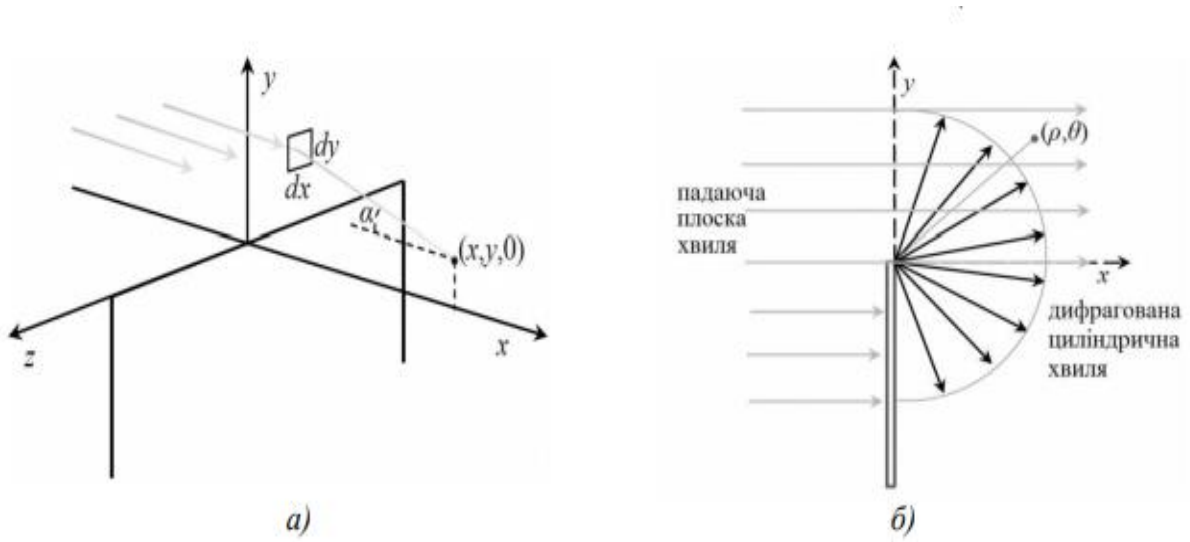


Рисунок 3.10 Плоска хвиля, що пройшла через поглинаючу напівплощину: а) в освітленій області; б) циліндричні хвилі, що виникають внаслідок дифракції на краю.

Сам коефіцієнт дифракції можна визначити за (3.14).

$$D_{UTD}(\theta) = D_{GTD}(\theta) F(S); \qquad (3.14)$$

де $D_{GTD}(\theta)$ – коефіцієнт дифракції в рамках геометричної теорії дифракції; $F(S)$ – функція переходу (пов'язана з інтегралами Френеля); θ – кут між віссю x та лінією від краю до точки приймача такий, так що $\sin\theta = \frac{y}{\rho}$.

Функція переходу (англ. transition function) $F(S)$ – це математична функція, яка визначає залежність між вхідним і вихідним сигналами в системі. Вираз функції переходу F(S) визначається через інтеграли Френеля та описується за допомогою наступної формули [79]:

$$F(S) = 2i\sqrt{S}e^{is}\int_{\sqrt{S}}^{\infty}\exp(-iu^2)du; \quad (3.15)$$

$$S = 2k\cos^2\psi\frac{r_1r_2}{r_1r_2}\sin^2(\theta/2); \quad (3.16)$$

3.4.3 Дифракція, спричинена прямокутним провідним клином

Прямокутний провідний клин – це геометрична фігура, що має форму прямокутного трикутника або клину з прямими кутами. В контексті радіохвильоводів або електромагнітних хвиль дифракція на прямокутних провідних клинах може виникати при взаємодії хвиль з цією геометричною структурою. Для прямокутного провідного клину, коефіцієнт дифракції визначається наступним чином [77]:

$$D(\theta) = D_1 + D_2 + \Gamma_{E,H}(D_3 - D_4); \quad (3.17)$$

де $\Gamma_{E,H}$, визначається залежно від поляризації падаючих хвиль (E або H), які паралельні ребру клину:

$$D_{1,2} = \frac{-1}{3\sqrt{2\pi k}}\cot\left(\frac{\pi\pm(\varphi_1-\varphi_2)}{3}\right); \quad (3.18)$$

$$D_{3,4} = \frac{-1}{3\sqrt{2\pi k}}\cot\left(\frac{\pi\pm(\varphi_1+\varphi_2)}{3}\right); \quad (3.19)$$

$$\theta = \pi - (\varphi_1 - \varphi_2);$$

Дифракційне поле, що виникає при нахилі променів під кутом ψ до краю (рис. 3.8 г):

$$E_D(r,\theta) = E_0\sqrt{D_{TX}(\alpha)}e^{-i\pi/4}\frac{D(\theta)}{\cos\psi}\frac{e^{-ik(r_1+r_2)}}{\sqrt{r_1r_2}}; \quad (3.20)$$

Додатково обчислення переходу $F(S)$ в тіньову область можливо за допомогою виразу [77]:

$$F(S) = \sqrt{2\pi S}\left[f\left(\sqrt{2\pi S}\right) + ig(\sqrt{2\pi S})\right]; \quad (3.21)$$

Графіки залежностей коефіцієнта дифракції для різних значень $\lambda, r_2, \phi_2, \theta$ (рис. 3.11, рис. 3.12).

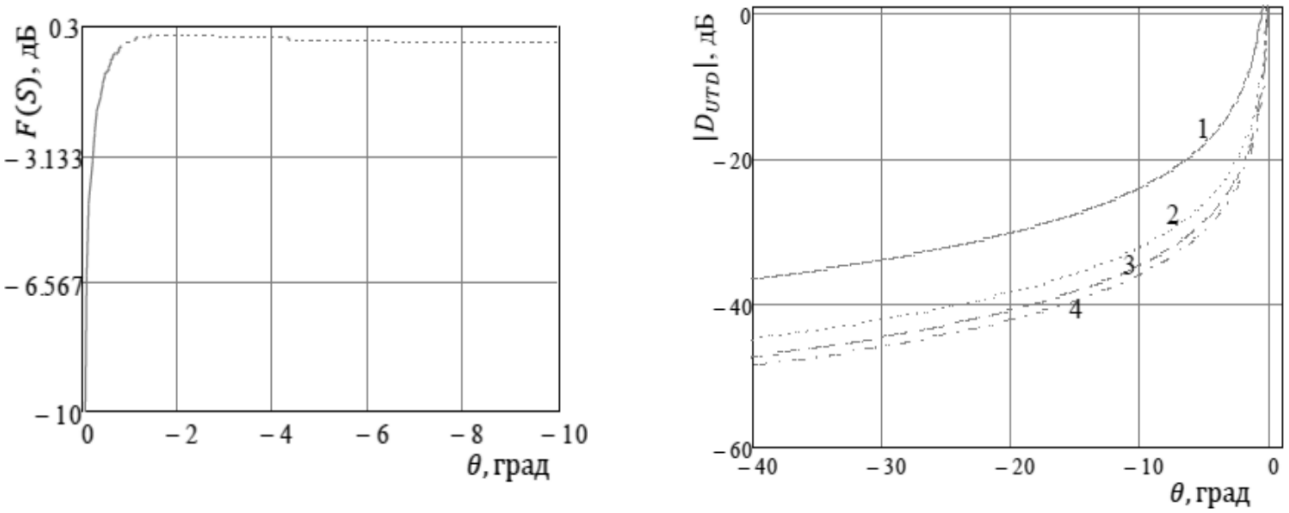
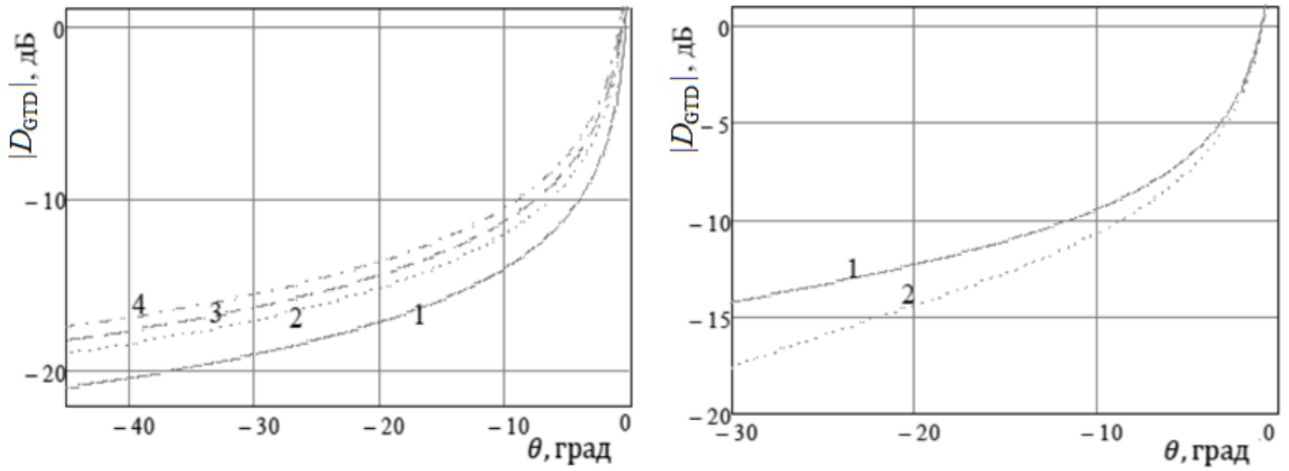


Рисунок. 3.11 Розраховані моделі[77]: а) – залежності функції переходу $F(S)$від кута θ; б) – залежності коефіцієнта дифракції UTD від кута θ при $r_1 = 100$ (м) та $\varphi = 10$: 1) $r_2 = 100$ (м), 2) $r_2 = 15$ (м), 3) $r_2 = 30$ (м), 4) $r_2 = 30$ (м);



а) *б)*

Рисунок. 3.12. Розраховані залежності коефіцієнта дифракції ГТВ від кута θ : а): 1) для $\varphi_2 = 10°$ 2) для $\varphi_2 = 35°$ $\lambda = 2$(мм); б) для різних довжин хвиль ($\varphi_2 = 45°$): 1) $\lambda = 2$(мм), 2) $\lambda = 5$(мм), 3) $\lambda = 7$(мм), 4) $\lambda = 2$(мм).

3.4.4 Оцінка втрат і відбиття сигналу у міліметровому діапазоні при відбиваннях

У залежності від характеристик поверхні, можна розподілити відбивання променів на дві категорії: дзеркальне та дифузне. Для міліметрових хвиль (1-10 мм) можливе використання різних підходів, які враховують шорсткість та розмір нерівностей поверхні. Зазвичай дифузне розсіювання виключають з алгоритмів розрахунку бюджету для дециметрового діапазону. Але для випадків вузько спрямованого випромінювання міліметрових хвиль у міських сценаріях, де присутні металеві поверхні, пластикові дзеркала, бетонні та гіпсові конструкції, важливо враховувати поверхневі шорсткості та шаруваті поверхні, такі як фарба чи подвійне скло [77].

Як зазначається в [77], вирішення завдань, пов'язаних з розсіюванням електромагнітних хвиль на шорстких поверхнях, може вимагати чисельного моделювання на основі методів інтегральних або диференційних рівнянь Максвелла. Однак ці чисельні підходи є складними та трудомісткими. Проаналізувавши джерела, автори [77] роблять висновок, що у певних умовах застосування аналітичних наближень може бути ефективним, дозволяючи моделювати та оптимізовувати енергетичне покриття.

Стверджується [77], що допускаючи, що розподіл нерівностей на поверхні є Гаусовим, можна використовувати метод, який включає множення коефіцієнта відбивання, отриманого з рівнянь Френеля, на коефіцієнт шорсткості Релея.

$$K_{Rayl} = \exp\left[-\frac{1}{2}(4\pi\delta\ cos\theta_j/\lambda)^2\right]; \qquad (3.22)$$

де θ_j – кут падіння і відбивання; δ – міра стандартного відхилення, яка визначає характер шорсткої поверхні; λ – довжина електромагнітної хвилі у вільному просторі.

Коефіцієнт відбиття залежить від кута падіння і знижується при кутах, які менше за кут Брюстера [77] $\theta_B = n\ arctg\ \sqrt{\varepsilon_r}$, а також збільшується при кутах, які більші за кут Брюстера. Також інші дослідники, аналізуючи експерименти [80],

констатують, що для терагерцового діапазону (починаючи з 100 (ГГц)) ТЕ поляризація виявляє більшу здатність до відбиття, ніж ТМ поляризація(поперечно-електрична (ТЕ) і поперечно-магнітна (ТМ)). Коефіцієнти відбивання, а саме Γ_{TE} і Γ_{TM}, взаємозв'язані з коефіцієнтами поглинання та індексами заломлення, що визначаються рівняннями Френеля[81].

$$\Gamma_{TE} = \frac{Z\cos\theta_j - Z_0\cos\theta_t}{Z\cos\theta_j - Z_0\cos\theta_t}, \Gamma_{TM} = \frac{Z\cos\theta_j - Z_0\cos\theta_t}{Z\cos\theta_j - Z_0\cos\theta_t}; \quad (3.23)$$

де $\theta_t = \arcsin(\sin(\theta_j)\, Z/Z_0)$ – кут заломлення; Z_0 – імпеданс вільного простору $Z_0 = 377\ \Omega$; Z – імпеданс матеріалу, що відбиває електромагнітні хвилі, та може бути розрахований з використанням наступного виразу:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0(n^2 - \left(\frac{\beta\lambda}{4\pi}\right)^2 - i(2n\beta\lambda/4\pi)}}; \quad (3.24)$$

де μ_0 та ε_0 – магнітна і діелектрична проникності вільного простору; n та β – показники заломлення і поглинання будівельного матеріалу відповідно [80].

Показники заломлення та коефіцієнт поглинання для скла, штукатурки та дерева на рис 3.13. Для всіх трьох зразків коефіцієнти поглинання значно зростають із збільшенням частоти, в той час, як показники заломлення залишаються досить стійкими щодо частоти.

У дослідженні [80] вимірювалися коефіцієнти відбиття для скла, гіпсу та дерева (рис 3.14) для семи різних кутів падіння ТЕ і ТМ. Для поляризації ТЕ коефіцієнти відбиття зростають із збільшенням кута падіння. У випадку поляризації ТМ, коефіцієнт відбиття є спадаючою функцією для кутів менших за кут Брюстера і зростаючою для кутів більших за кут Брюстера. З трьох матеріалів, які були виміряні, скло виявилося найкращим за відбиванням, тоді як дерево є менш відбиваючим.

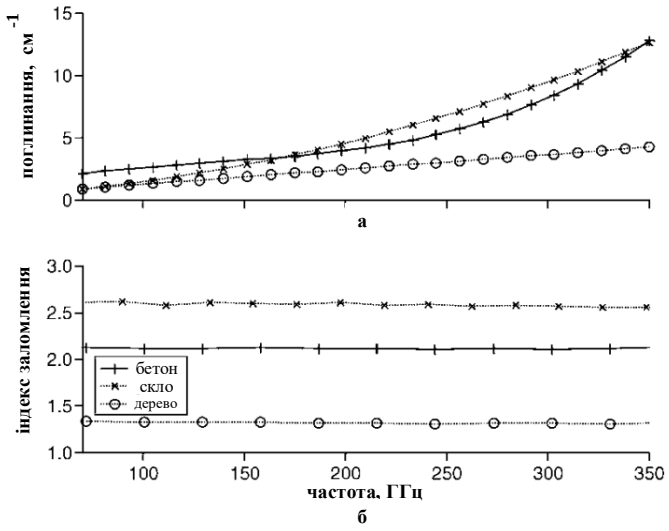


Рисунок 3.13. Результати вимірювань коефіцієнта поглинання та показника заломлення для будівельних матеріалів у геометрії передачі. а) Коефіцієнт поглинання. б) Показник заломлення .

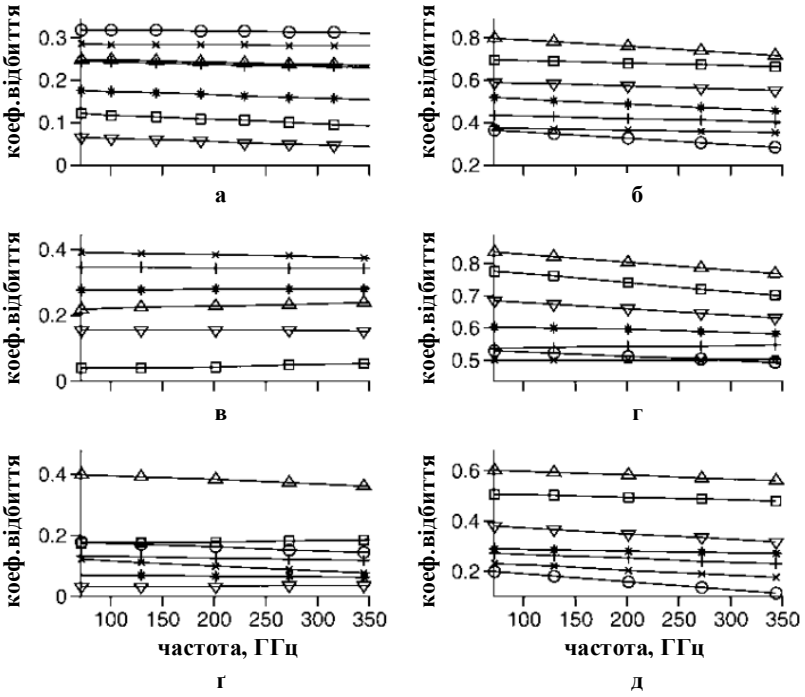


Рисунок 3.14. Результати вимірювань коефіцієнта відбиття (адаптовані до поліномів першого ступеня) будівельних матеріалів для TM і TE поляризації при різних кутах падіння у встановленні для відбиття. а) Бетон TM; б) Бетон TE; в) Скло TM; г) Скло TE; ґ) Деревина TM; д) Деревина TE; ∘ 20 °; × 30 °; + 40 °;*∘ 50 °; ∨ 60 °; □ 70 °; △ 75 °;

Також автори [80] наводять результати розрахунків коефіцієнтів відбиття для досліджуваних матеріалів (рис 3.15) для кутів падіння від 0 до 90 градусів для хвиль ТЕ і ТМ при частотах 150 і 300 (ГГц). Прямі вимірювані коефіцієнти відбиття позначені символами для порівняння.

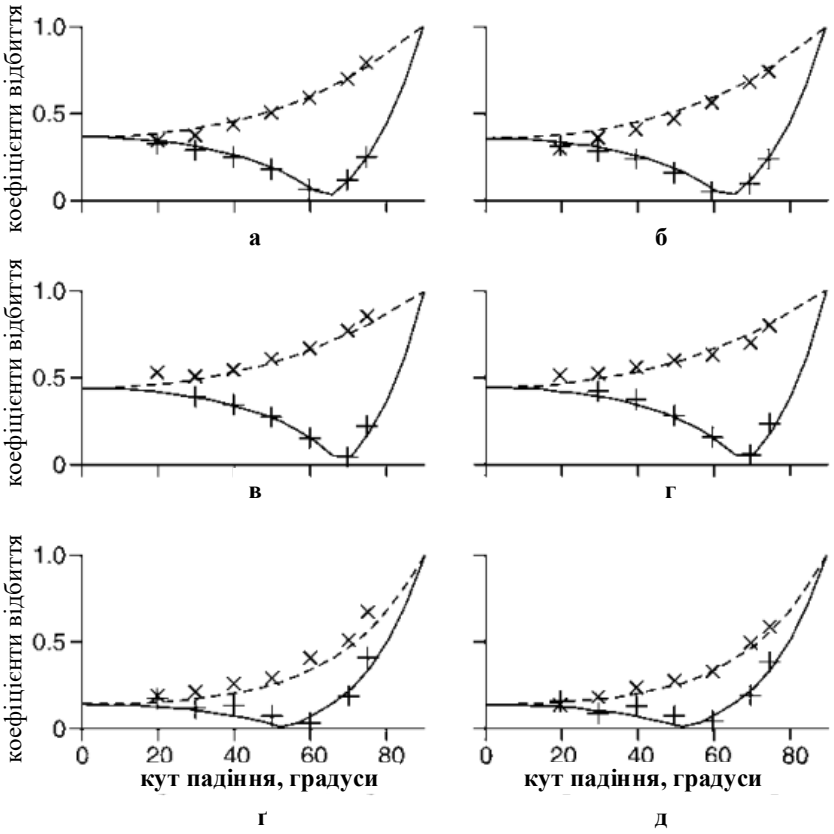


Рисунок 3.15. Розраховані коефіцієнти відбиття для ТМ і ТЕ поляризованих хвиль на частотах 150 та 300 (ГГц).

де а) Бетон на 150 (ГГц); б) Бетон на 300 (ГГц); в) Скло на 150 (ГГц); г) Скло на 300 (ГГц); ґ) Скло на 300 (ГГц); д) Дерево на 150 (ГГц); е) Дерево на 300 (ГГц);

− − − − теоретично розраховані для ТЕ поляризації;

× виміряні для ТЕ поляризації; − теоретично розраховані для ТЕ поляризації;

+ виміряні для ТЕ поляризації;

Для різних довжин хвиль міліметрового діапазону на рис. 3.16 наведені значення коефіцієнтів відбивання (для бетону), помножених на коефіцієнт Релея,

розраховані у [77]. Частотні та кутові характеристики коефіцієнта відбивання виявляють значні відмінності. Крім того, спостерігається явище інтерференції відбитих хвиль, що може призводити як до посилення, так і до згасання сигналу.

Порівнюючи коефіцієнти посилення через дифракцію і відбиття, можна відзначити, що більш суттєвий внесок надає процес відбиття. Однак теоретично, урахування сумарного внеску за допомогою багатопроменевої моделі з множинними дифракціями та відбиттям для різних шляхів може призвести до певного відчутного підсилення сигналу на шляху.

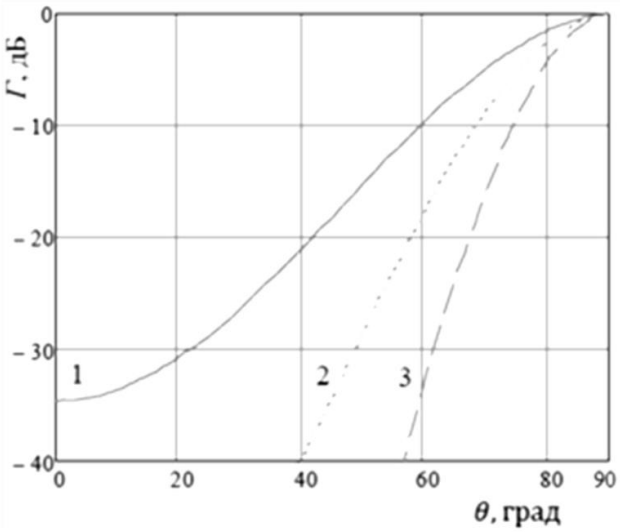


Рисунок 3.16. Залежність коефіцієнта відбиття для різних довжин хвиль міліметрового діапазону з урахуванням кута падіння та ТЕ поляризації, де коефіцієнт шорсткості Релея використовується для врахування впливу поверхневої текстури. 1) λ = 10 (мм); 2) λ = 5 (мм); 3) λ = 3 (мм).

3.4.4 Моделі каналів в міліметровому діапазоні з урахуванням ефектів розсіювання

Для поверхонь з нерівностями, крім основної відбитої частини при дзеркальному відбитті також спостерігається розсіяне випромінювання, яке розподіляється в різних напрямках. Отже, загальна розсіяна потужність

некогерентних променів додається до потужності когерентних променів, що у підсумку дає потужність на вході приймача, котру можна виразити, як $P_{RX} = P_{coher} + P_{scat}$.

Для Гауссового розподілу (3.22) нерівностей, коефіцієнт відбиття набуває вигляду:

$$\Gamma_{rough} = \Gamma\, K_{Rayl}; \tag{3.25}$$

Вираз (3.25), хоч і базується на припущенні малого кута падіння, не надає можливості розрахувати потужність розсіювання в конкретному напрямку. Для аналізу характеру розсіювання в певному напрямку, в залежності від характеристик нерівностей стін, вводяться різні моделі. Головним чином розглядаються дві відомі моделі розсіювання, які використовуються для моделювання каналів у міліметровому діапазоні для стільникових систем зв'язку: модель спрямованого розсіювання (англ. Directive scattering, (DS)) і модель радіолокаційного перетину розсіяння (Radar Cross Section, RCS) [81]. Експериментальні дані підтверджують, що розсіювання може виявитися значущим механізмом поширення радіохвиль для даного діапазону хвиль [68].

Якщо розглядати модель розсіювання, коли кут падіння електромагнітної хвилі на поверхню $\theta_i \in [0^\circ, 90^\circ]$, для моделі спрямованого розсіювання, електричне поле розсіюється в довільному напрямку, враховуючи зворотне розсіювання, $\theta_s \in [-90^\circ, 90^\circ]$.

$$|\overline{E_s}|^2 = \left(\frac{KS}{r_i \rho_j}\right)^2 \frac{dS\cos\theta_i}{F_{\alpha_R}} \left(\frac{1+\cos\psi}{2}\right)^{\alpha_R}; \tag{3.26}$$

де E_s – розсіяне електричне поле під кутом розсіювання; K – стала, залежна від амплітуди падаючої хвилі; r_i та ρ_j – відстані між передавачем до розсіювача, і від розсіювача до приймача; dS – площа розсіювача; ψ -кут між відбитою та розсіяною хвилями; F_{α_R} – коефіцієнт масштабування для нормалізації до загальної розсіяної потужності[81]:

$$F_{\alpha_R} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left(\frac{1+cos\psi}{2}\right)^{\alpha_R} sin\theta_S d\theta_S.; \quad (3.27)$$

Також щільність потоку потужності розсіяної хвилі [82]:

$$\rho_d = \frac{|\overline{E_S}|^2}{120\pi}; \quad (3.28)$$

Тоді при формуванні вузького променю, для одного відбиття, не враховуючи поглинання в атмосфері, можна перейти до виразу потужності на вході приймача:

$$P_{RX} = \rho_d \, A_{RX} = \frac{|\overline{E_S}|^2 A_{RX}}{120\pi}; \quad (3.29)$$

Модель RCS зазвичай передбачає, що розсіюючий об'єкт вважається ідеальним електричним провідником, що може не відображати реальні умови в середовищі. Значення RCS для різних розсіюючих об'єктів зазвичай емпірично визначаються на основі результатів вимірювань. Кількісна характеристика потужності, яку розсіювач перехоплює і випромінює знову в напрямку приймача, визначається ефективною площею розсіювання (ЕПР) – σ.

Величина, яка вказує на обсяг падаючої потужності, яку розсіювач перехоплює та перевипромінює в напрямку приймача, визначається як RCS [81]. «Щільність потоку потужності» – величина, що описує енергію, котра розсіюється та випромінюється в напрямку приймача, визначається як:

$$\rho_d = \frac{P_{TX}}{4\pi d^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi d^2}; \quad (3.30)$$

Тоді прийняту потужність можна представити наступним чином:

$$P_{RX} = \frac{P_{TX} A_{RX} \sigma}{16\pi^2 d^4}; \quad (3.31)$$

При розсіюванні поверхнею, необхідно враховувати нерівності великомасштабні та дрібномасштабні, тобто σ_{rough} та σ_{smooth}:

$$\sigma = \sigma_{rough} + |\chi_s|^2 \sigma_{smooth}; \tag{3.32}$$

де χ_s – це характеристична функція, залежна від висоти нерівностей на шорсткій поверхні.

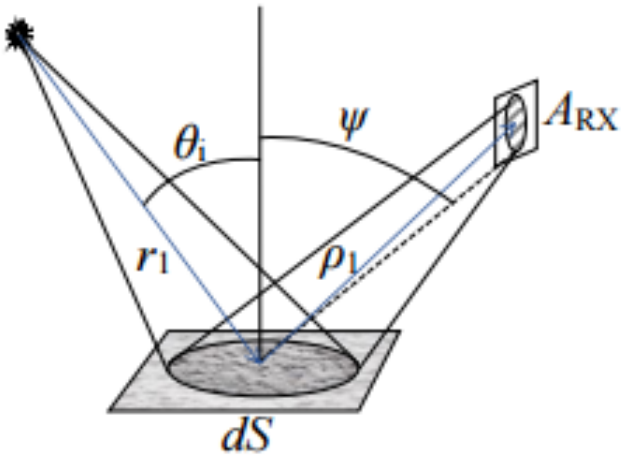


Рисунок 3.17. Формування вузького променю та його відбиття на розсіюючій поверхні.

У контексті двовимірних моделей [81] звертається увага лише на ширину розсіюючого об'єкта, оскільки припускається, що його довжина має розмір одиниці. Таким чином, для моностатичної моделі зазначають:

$$\sigma_{smooth} = \frac{2\pi\omega^2}{\lambda}\left[cos\theta_i \frac{sin(k_0\omega cos\theta_i)}{k_0\omega cos\theta_i}\right]^2; \tag{3.33}$$

де ω – ширина об’єкту, що розсіює; k_0 – хвильове число у вільному просторі.

Таким чином, згладжуваний ефект знаходиться в оберненій залежності від довжини падаючої хвилі.

З [81] можна записати характеристичну функцію:

$$\chi_s = e^{-k_0^2 h_{rms}^2 cos^2(\theta_i)}; \quad (3.34)$$

де h_{rms} позначає середньоквадратичну помилку, яка характеризує варіацію висоти на дрібномасштабній поверхні.

При зниженні частоти найбільш помітним стає ефект згладжування. Проте, при досягненні частот терагерцового діапазону вплив шорсткості χ_s на значення розсіювання стає вагомішим. Методи визначення значень σ_{rough} розглянуті у [81] для малих випадково орієнтованих перетинів.

3.4.5 Модель для аналізу посилення в радіоканалі міліметрового діапазону з використанням штучного відбиття

Забезпечення доступності та дальності зв'язку в міліметровому діапазоні, зокрема в умовах відсутності прямої видимості, може бути реалізовано за допомогою використання штучних відбивачів. На основі [82] для одного відбиття можна записати:

$$P_{RX_2} \approx P_{TX} \frac{4S_{RX1}}{\pi\alpha^2 {r_1}^2} \cdot \frac{4A_{RX}}{\pi\alpha^2(\rho_1+\alpha S_{RX1}/\pi)^2} \approx P_{TX} \frac{16 S_{RX1} A_{RX}}{\pi^2 \alpha^4 r_1^2 \rho_1^2 L_{atm}(f_c, r_1, \rho_1)}; \quad (3.35)$$

Якщо передача радіосигналу використовує формування вузького променю, який відбивається від N відбивачів, то якщо $P_{RX,i} = k\, P_{TX,i}$, при коефіцієнті відбиття k, однаковому для всіх відбиваючих поверхонь, аналогічно до (3.35) можна виразити потужність сигналу на прийомі для системи NLOS:

$$P_{RX} \approx P_{TX} \left(\frac{4}{\pi\alpha^2}\right)^{(N+1)} A_{RX} \prod_{i=1}^{N} \frac{S_{RX,i}\, k_i}{r_1^2 \rho_1^2 L_{atm}(f_c, r_i, \rho_i)}; \quad (3.36)$$

При множинному випромінюванні сигналу (рис. 3.18, б) можна аналогічно виразити для одного відбиття та N променів для системи NLOS:

$$P_{RX} \approx P_{TX}\left(\frac{4}{\pi\alpha^2}\right)^{(2)} kA_{RX}\sum_{i=1}^{N}\frac{S_{RX,i}}{r_i^2 L_{atm}(f_c,r_i)\rho_i L_{atm}(f_c,\rho_i)}; \quad (3.37)$$

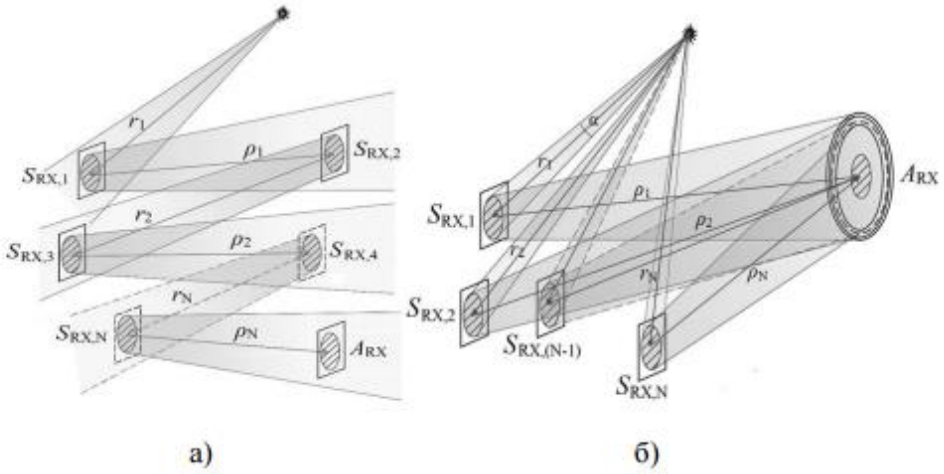


Рисунок 3.18. Підсилення сигналу радіоканалу міліметрового діапазону за допомогою штучних підсилювачів:

а) формування одного вузького променю, який багаторазово відбивається від N відбивачів;

б) багатопроменеве поширення сигналу для одного відбиття

Використовуючи як середовище для спрощених розрахунків моделі описаної вище середовище Mathcad v15, було проаналізовано можливі сценарії. Взявши за опорну точку модель потужності для випромінювання антени (3.9) та виразивши звідти рівняння для приймальної антени, її взято, як точку порівняння для варіанту при прямій видимості, тобто без використання штучних відбиттів:

$$P_{RX} = \frac{P_{TX}D_{TX}A_{RX}}{4\pi d^2 L_{atm}(f_c,d)}; \quad (3.38)$$

Також відрізки на шляху до відбиття, та після відбиття, будуть поширюватися вільному просторі, тому розглянемо залежність згасання у вільному просторі в

залежності від відстані на частоті 60 (ГГц), котре було використане при подальших обчисленнях, а також від частоти при фіксованій відстані, значення подано у дБ (рис. 3.19).

Початково зафіксувавши певні параметри для (3.36), зокрема, взято коефіцієнт відбиття для бетону, тому що це один із найпоширеніших матеріалів для міського середовища, $k_i = 0.8$ (рис 3.14). Оскільки в мережах 5-го покоління планується максимальне наближення до кінцевого користувача та можливі розгортання точок доступу радіусом від 1-10 метрів, або 10-100 метрів, було задано параметри відстані до відбиття та після, відповідно, по 5 метрів. Оскільки спочатку аналізувалося вузько спрямоване випромінювання, то закладено припущення, що і площа відбиття, повинна бути не значною, тому даний параметр зафіксовано, у розмірі $S_{RX,i} = 10^{-2}$ (м^2).

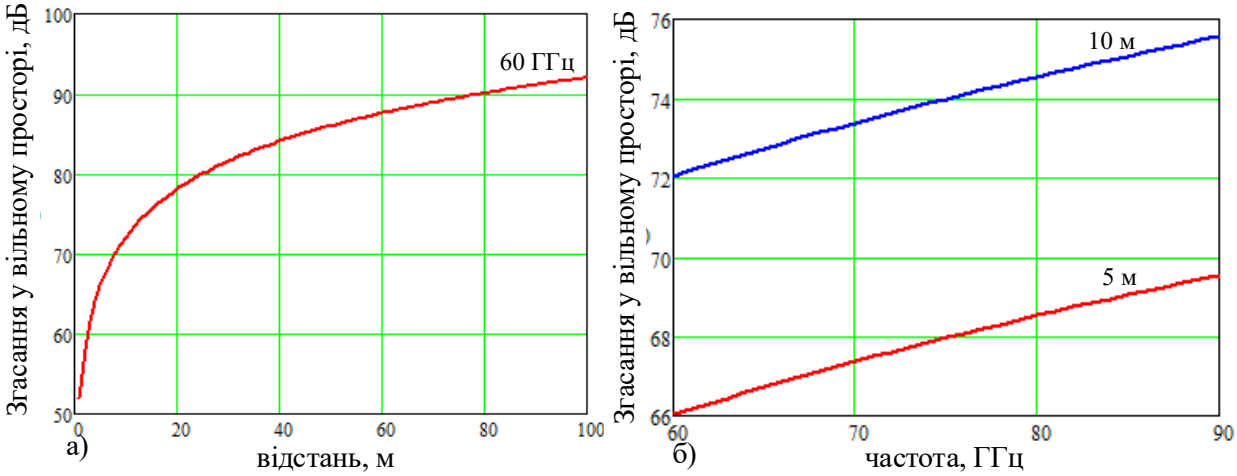


Рисунок 3.19. Залежність згасання у вільному просторів: а) від відстані; б) від частоти.

На рисунку 3.20 представлені результати обчислення залежності підсилення від різної кількості відбивачів та кута розкриву. Можна констатувати, що одне контрольоване відбиття може дати підсилення у потрібному напрямку, також кут розкриву впливає на дане підсилення, котре зменшується при збільшенні ширини променю.

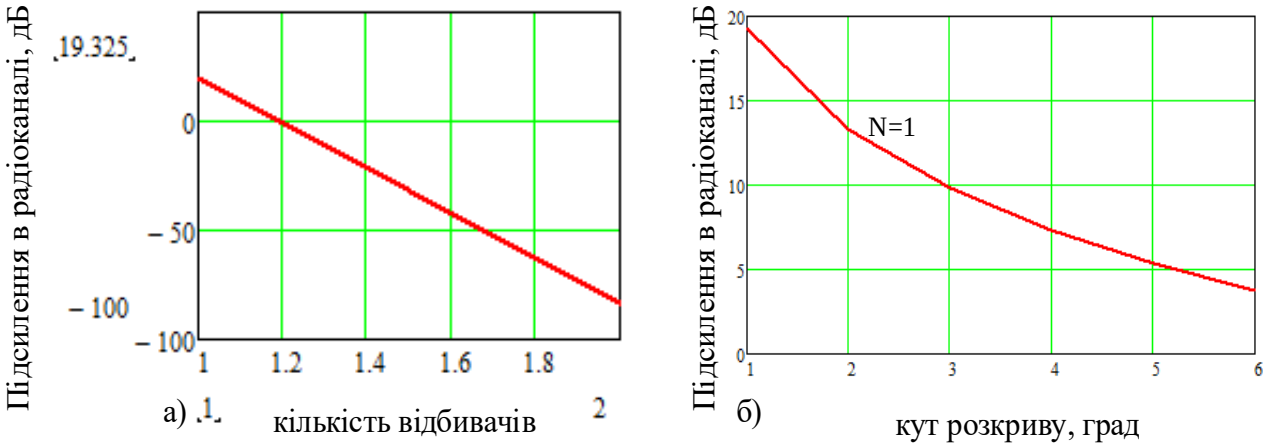


Рисунок 3.20. Залежність підсилення від: а) кількості відбивачів та б) кута розкриву.

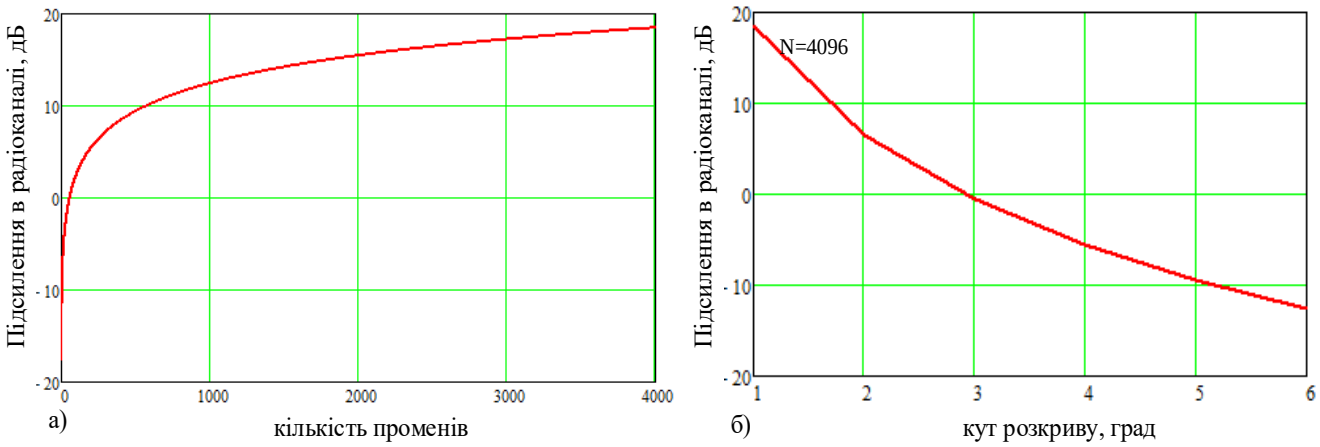


Рисунок 3.21 Залежність підсилення від: а) кількості променів та б) кута розкриву.

Розуміючи, що одне відбиття може дати позитивний ефект, розглянуто ситуацію, коли, наприклад, використано багатопроменеве поширення у варіанті NLOS, досліджено залежність для (3.37) відносно кількості променів та кута розкриву (рис. 3.21). Підсилення для варіанту багатопроменевого поширення досягається при збільшенні кількості вузькоспрямованих променів, але у такому варіанті система більш чутлива до кута розкриття, що цілком зрозуміло, за рахунок погіршення, можливості концентрації енергії в потрібному напрямку.

Також, важливо розглянути залежності від ефективної площі антени, наприклад, у випадку використання антенних решіток. У такому випадку, фіксуючи певні параметри, як вже зазначалося раніше, та оперуючи кількістю випромінюючих елементів N_{el} та відстані між ними d, тим самим збільшуючи ефективну площу, можна досягти додаткових покращень, наприклад, у випадку одного відбиття, зафіксувавши відстань між елементами $d = 10^{-2}$ (м), а потім навпаки корегуючи її (рис 3.22).

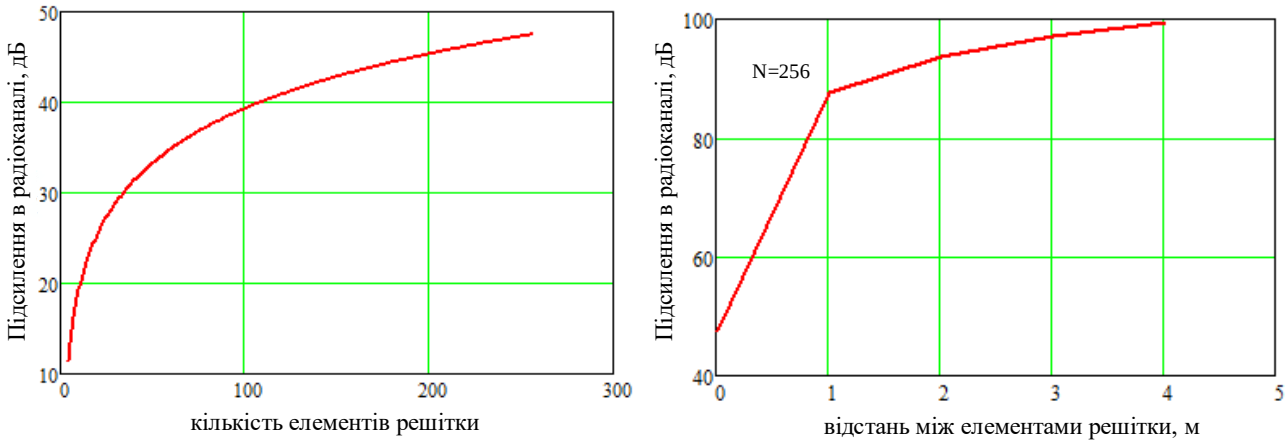


Рисунок 3.22. Залежність підсилення від ефективної площі антени: а) зміна кількості елементів та б) відстані між елементами.

Спостерігаємо покращення і у такому випадку, що логічно, адже при збільшенні ефективної площі, більше частина енергії може бути захоплена на приймальній стороні, хоча варіант корекції через відстань між елементами є в даному випадку нереалістичним.

Розглядаючи сценарій дослідження покращення через збільшення ефективної площі для багатопроменевого сценарію у випадку, коли кількість елементів буде змінюватися у відповідності до кількості променів, можна зафіксувати покращення у порівняння з захопленням енергії тільки у варіанті прямої видимості, вже починаючи з десятків елементів (рис 3.23). Розгляд ситуації збоку покращення ефективної площі, через відстань між елементами в даному випадку, є мало ймовірним.

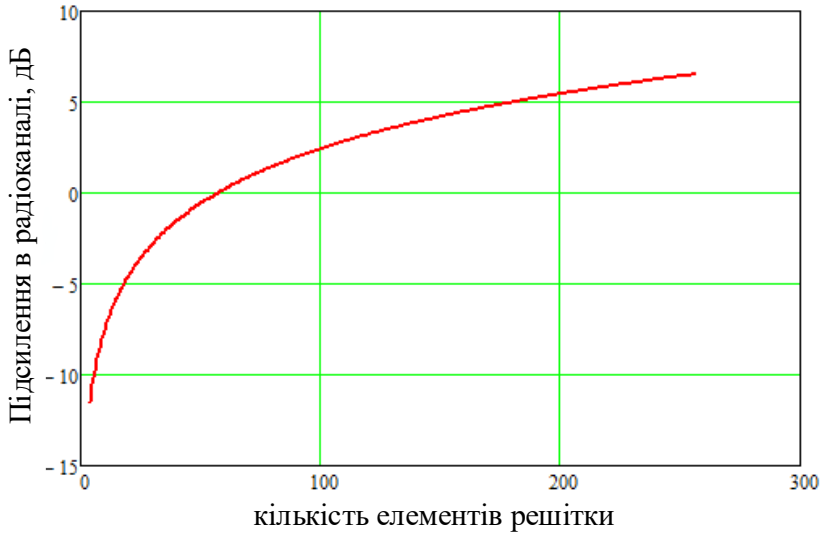


Рисунок 3.23. Залежність підсилення від ефективної площі антени: а) зміна кількості елементів та б) відстані між елементами.

Отже, результати проведених розрахунків свідчать, що використання моделювання та створення штучних відбивачів у радіоканалах міліметрового діапазону може підвищити сигнальний рівень у каналі та покращити умови відтворення інформації, або збільшити зону покриття.

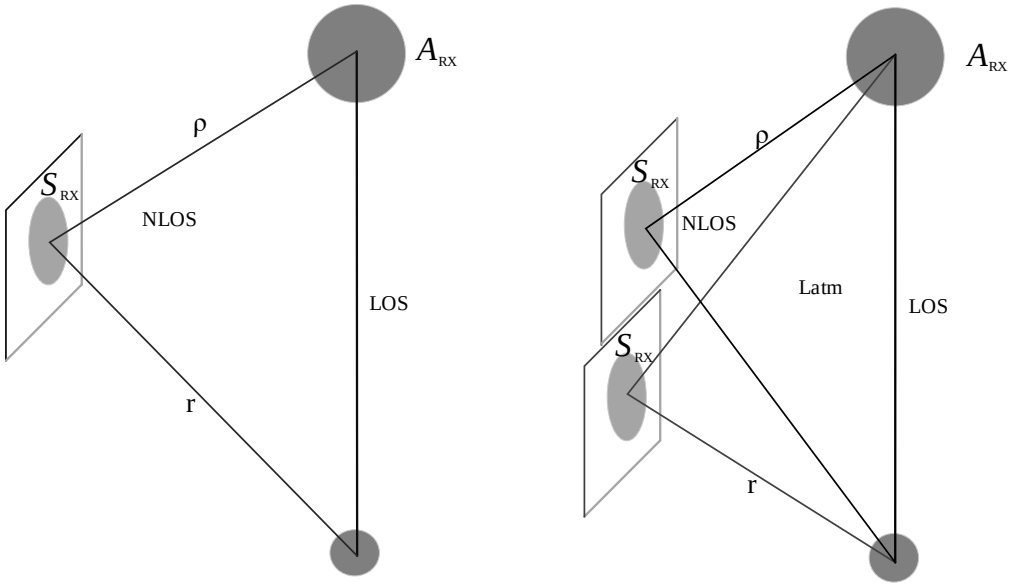


Рисунок 3.24. Моделювання та створення штучних відбивачів у радіоканалах міліметрового діапазону.

Аналізуючи геометрію території та застосовуючи фундаментальні фізичні принципи для проектування мереж у міліметровому діапазоні, можна здійснити ефективне управління енергією та спектральними ресурсами. Це виявляється особливо важливим при впровадженні технології MIMO. Такий підхід дозволяє оптимізувати роботу мереж та максимізувати їх продуктивність, що особливо важливо в умовах обмеженої енергії сенсорних мереж.

Висновки до розділу 3

У розділі розглянуто сучасні дослідження поширення радіохвиль міліметрового діапазону в різних умовах та сценаріях.

Доведено, що використання міліметрового діапазону в місті може значно розширити частотний ресурс, що стане основою для збільшення пропускної здатності та впровадження нових технологій у телекомунікаційних системах.

Впровадження міліметрового діапазону фокусується на вирішенні технічних проблем. Зокрема, для повноцінного їх застосування в телекомунікаційних системах потрібні натурні дослідження та застосування досягнень у галузі використання гетерогенних мереж та гібридних технологій.

Моделювання каналів для 5G в міліметровому діапазоні вимагає фундаментальних фізичних підходів. Врахування параметрів та характеристик у приймально/передавальному обладнанні, а також врахування поширення хвиль в різних середовищах є ключовими аспектами.

Окрім того, у розділі розглядаються підходи до моделювання радіоканалів та розробки методик для підвищення якості передачі даних у телекомунікаційних системах у міліметровому діапазоні. Математичні моделі каналів для бездротових технологій 5G і наступних поколінь наразі розробляються, а для точних моделей каналів 5G у міліметровому діапазоні потрібно забезпечити фундаментальну фізичну основу.

У контексті розгляду мобільних систем міліметрового діапазону для міського сценарію виявлено, що ефективність може бути істотно підвищена. Зокрема, шляхом

застосування рішень, які використовують дифракцію і відбиття для посилення сигналу. В конкретних умовах міського середовища важливими є штучні відбивачі, здатні підсилити сигнал, тим самим теоретично розширити зону покриття та енергоефективність.

Загалом, також можна констатувати важливість подальших досліджень та розробок у галузі з використанням міліметрового діапазону в телекомунікаційних системах, зокрема продовжувати вивчення особливостей поширення хвиль у даному діапазоні та використання середовища.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі було розв'язано актуальне завдання розроблення теоретичних підходів щодо підвищення якості передачі сигналу в телекомунікаційних системах, зокрема бездротових сенсорних мережа в міліметровому діапазоні за рахунок використання суперпозиції та відбиття сигналу у складних умовах міста. Проведено аналіз теоретичних та практичних підходів з підвищення якості передачі сигналу в бездротових сенсорних мережах.

Отримані результати мають важливе значення й можуть бути використані для планування та проектування майбутніх телекомунікаційних сенсорних мереж. Запропоноване рішення може бути застосоване в різноманітних умовах, забезпечуючи універсальний підхід до поліпшення можливостей мереж радіодоступу. А також результати можуть бути використані в подальших дослідженнях щодо підвищення якості передачі сигналу в інших смугах пропускання міліметрового діапазону хвиль.

Досліджено доцільність використання стільникових мереж п’ятого покоління, зокрема в міліметровому діапазоні, яке може значно розширити частотний ресурс і стати основою для підвищення пропускної здатності та впровадження нових технологій у телекомунікаційних системах.

Розглянуті підходи до моделювання радіоканалів, отримано модель розповсюдження сигналу в міліметровому діапазоні радіохвиль на частоті 60-65 ГГц у міському середовищі. Модель дозволила математично обґрунтувати теоретичні підходи щодо створення сенсорних мереж.

Розроблена методика для підвищення якості передачі сигналу телекомунікаційних системах в міліметровому діапазоні за рахунок застосування суперпозиції та відбиття для посилення сигналу в Е-діапазоні радіохвиль сенсорних мереж, які використовуються в мобільних системах міського середовища. Це дозволяє розширити зону покриття або зменшити енерговитрати в приймально-передавальних пристроях, що підкреслює важливість фундаментальної фізичної основи для точних моделей каналів 5G.

Виявлено, що якість передачі сигналу в мобільних систем міліметрового діапазону, 60-65 ГГц у міському середовищі може бути істотно підвищена за рахунок використання дифракції та відбиття для посилення сигналу, в роботі отримано покращення на 50 дБ. Важливою складовою є штучні відбивачі, які можуть підсилити сигнал, теоретично розширюючи зону покриття або зменшуючи використовувану енергію.

Подальший розвиток досліджень в галузі використання міліметрового діапазону у телекомунікаційних системах повинно бути продовжено для вивчення особливостей поширення радіохвиль хвиль цього діапазону з використанням моделювання для ефективного впровадження нових теоретичних та технологічних рішень для забезпечення надійного, енергоефективного та швидкого зв'язку в сенсорних мережах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Volynets V. Multimedia: concept, essence and scope. *International Bulletin: Culturology. Philology. Musicology.* 2016. № 1. С. 98–102.

2. Green Heterogeneous Cloud Radio Access Networks: Potential Techniques, Performance Tradeoffs, and Challenges / Y. Li та ін. *IEEE Communications Magazine. 2017.* Т. 55, № 11. С. 33–39.

3. Green internet of things for smart world / C. Zhu та ін. *IEEE access*. № 3. С. 2151–2156.

4. Radiocommunication Sector I. T. U. Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s). 2017. 11 с.

5. Björnson E., Larsson E. G. How energy-efficient can a wireless communication system become?. *Asilomar conference on signals, systems, and computers*, 4 груд. 2018 р. С. 1–2.

6. A survey of green networking research / A. Prem та ін. *IEEE communications surveys & tutorials.* 2012. Т. 14, № 1. С. 1–5.

7. Green radio: radio techniques to enable energy-efficient wireless networks / C. Han та ін. *IEEE communications magazine.* 2011. Т. 49, № 6. С. 46–49.

8. Nabeel M., Masood U. R. Green communications: techniques and challenges. *EAI endorsed transactions on energy web and information technology.* 2017. С. 3–5.

9. Woongsup L., Chul J. B. Improving energy efficiency of cooperative femtocell networks via base station switching off. *Mobile information systems.*2016. Т. 2016. С. 1–5.

10. Степанов М., Лавріненко В. Огляд компонентів для енергоефективних мультимедійних мереж на основі технологій радіодоступу 5G. Measuring and computing devices in technological processes. 2024. № 1. С. 7–12. URL: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-1.

11. Kizilirmak R. C. Non-Orthogonal multiple access (NOMA) for 5G networks. intechopen.com. URL: https://www.intechopen.com/chapters/52822 (дата звернення: 07.05.2021).

12. Ding Z., Adachi F., Poor H. V. The application of MIMO to non-orthogonal multiple access. *IEEE transactions on wireless communications.* 2016. Т. 15, № 1. С. 537–538.

13. Green internet of things (IoT): an overview / M. A. M. Albreem та ін. *IEEE 4th international conference on smart instrumentation, measurement and application (ICSIMA)*, 28–30 листоп. 2017 р. 2017. С. 2–6..

14. Vijayalakshmi S. R., Muruganand S. *Wireless sensor networks: architecture • applications • advancements.* Dulles, Virginia, 2018. С. 1–30.

15. What does the noun sensor mean?. *Oxford English Dictionay*. URL: https://doi.org/10.1093/OED/7414483006 (дата звернення: 01.06.2023).

16. Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey / D. Kandris та ін. Applied system innovation. 2020. Т. 3, № 1. С. 1–20.

17. Sohraby K., Minoli D., Znati T. Wireless sensor networks. Technology, Protocols, and Applications. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2007. 328 с.

18. TinyOS documentation wiki. *TinyOS*. URL: http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/TinyOS_Overview (дата звернення: 09.09.2023).

19. Contiki-NG documentation. *Contiki-NG*. URL: https://docs.contiki-ng.org/en/develop/ (дата звернення: 09.09.2023).

20. Riot OS Features. *Riot OS*. URL: https://www.riot-os.org/ (дата звернення: 09.09.2023).

21. Why FreeRTOS?. *freeRTOS*. URL: https://www.freertos.org/ (дата звернення: 09.09.2023).

22. About Apache NuttX. NuttX. URL: https://nuttx.apache.org/docs/latest/introduction/about.html (дата звернення: 09.09.2023).

23. SS95323. IEEE std 802.15.1™-2005. На заміну IEEE Std 802.15.1-2002 ; чинний від 2005-05-31. Вид. офіц. New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2005. 600 с.

24. Bluetooth technology overview. Bluetooth. URL: https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/ (дата звернення: 09.09.2023).

25. Introduction of 802.11. *forum.huawei.com.* URL: https://forum.huawei.com/enterprise/en/introduction-of-802-11/thread/693489225829335040-667213871523442688?author=667213028036321290 (дата звернення: 09.09.2023).

26. Who we are. *wi-fi.org*. URL: https://www.wi-fi.org/who-we-are (дата звернення: 09.09.2023).

27. SS95552. IEEE std 802.15.4™-2006. Чинний від 2006-06-07. Вид. офіц. New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2006. 323 с.

28. UG103.2: zigbee fundamentals. silabs.com. URL: https://www.silabs.com/documents/public/user-guides/ug103-02-fundamentals-zigbee.pdf (дата звернення: 09.09.2023).

29. Technology overview. *z-wavealliance.org.* URL: https://z-wavealliance.org/technology-overview/ (дата звернення: 09.09.2023).

30. Z-Wave global regions. *silabs.com*. URL: https://www.silabs.com/wireless/z-wave/global-regions (дата звернення: 09.09.2023).

31. Rahman Z. U. GSM technology: architecture, security and future challenges. *International journal of science engineering and advance technology.* 2017. Т. 5, № 1. С. 70–74.

32. Zibayiwa M. GSM global system for mobile communications. *Institution science club meeting. 2020*. URL: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28364.77441 (дата звернення: 09.09.2023).

33. He G. Overview of UMTS : монографія. Helsinki : Helsinki University of Technology. Telecommunication Software and Multimedia Laboratory. 44 с.

34. Dethan J. F. Wireless Broadband (UMTS). 2015. 2 с. URL: https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1842.3766 (дата звернення: 09.09.2023).

35. ETSI TS 125 106 V10.2.0. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); UTRA repeater radio transmission and reception. Вид. офіц. Sophia Antipolis : European Telecommunications Standards Institute, 2012. 39 с.

36. LTE-A an overview and future research areas / S. Jimaa та ін. *WiMob 2011* : IEEE 7th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, м. Shanghai, 10–12 жовт. 2011 р. 2011. С. 395–398. URL: https://doi.org/10.1109/WiMOB.2011.6085370.

37. Bakare B. I. A technical review of long term evolution (LTE) operations. *American journal of engineering research (AJER)*. 2022. Т. 11, № 4. С. 132–136.

38. LTE frequency bands. *everythingrf.com*. URL: https://www.everythingrf.com/community/lte-frequency-bands (дата звернення: 09.09.2023).

39. Габовда О. В., Садовнікова Т. М. *Analysis of mobile networks 4th generation and prospects for implementation in Ukraine. Technology audit and production reserves.* 2016. Т. 2, № 2. С. 6–7. URL: https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.66362 (дата звернення: 09.09.2023).

40. Enhanced mobile broadband as enabler for 5G: actions from the framework of the 5G-DRIVE project / I. P. Chochliouros та ін. *AIAI 2019: artificial intelligence applications and innovations* : матеріали конф. 2019. С. 31–40. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-19909-8_3.

41. ETSI TS 122 261 V16.14.0. Service requirements for the 5G system. Вид. офіц. Sophia Antipolis : ETSI, 2021. 72 с.

42. Jovovic I., Forenbacher I., Periša M. Massive machine-type communications: an overview and perspectives towards 5G. *The 3rd international virtual research conference in technical disciplines, RCITD 2015* : матеріали конф., м. Zilina, 19–23 жовт. 2015 р. 2015. С. 31–36.

43. 3GPP TR 21.915 V15.0.0. 3rd generation partnership project; technical specification group services and system aspects; release 15 description; summary of rel-15 work items (release 15). Вид. офіц. Sophia Antipolis : 3GPP, 2019. 117 с.

44. Imane Z., Mazri T., Amine E. 5g: architecture overview and deployments scenarios. *5th international conference on smart city applications*, м. Safranbolu, 7–8 жовт. 2020 р. 2020. С. 436–437. URL: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W3-2020-435-2020.

45. Степанов М., Лавріненко В. Зв’язок елементів сенсорної мережі системи моніторингу. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2023. № 4. С. 199–201. URL: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-27.

46. Utilization of 5G technologies in iot applications: current limitations by interference and network optimization difficulties–a review / M. Pons та ін. Sensors. 2023. Т. 23, № 8. С. 2–20. URL: https://doi.org/10.3390/s23083876.

47. Rahimi H., Zibaeenejad A., Safavi A. A. A novel iot architecture based on 5g-iot and next generation technologies. *2018 IEEE 9th annual information technology, electronics and mobile communication conference (IEMCON)* : матеріали конф., м. Vancouver, 1–3 листоп. 2018 р. Piscataway, 2018. С. 81–88. URL: https://doi.org/10.1109/IEMCON.2018.8614777.

48. Internet of things (IoT) security: current status, challenges and prospective measures / R. Mahmoud та ін. *2015 10th international conference for internet technology and secured transactions (ICITST)* : матеріали конф., м. London, 14–16 груд. 2015 р. 2015. С. 336–341. URL: https://doi.org/10.1109/ICITST.2015.7412116.

49. A software defined networking architecture for the internet-of-things / Z. Qin та ін. *2014 IEEE network operations and management symposium (NOMS)* : матеріали конф., м. Krakow, 5–9 трав. 2014 р. 2014. С. 1–5.

50. Ericsson mobility report. Stockholm : Ericsson, 2023. 40 с. URL: https://www.ericsson.com/49dd9d/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2023/ericsson-mobility-report-june-2023.pdf (дата звернення: 21.07.2023).

51. Formal (3GPP) Definition. *sharetechnote.com*. URL: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Definition.html#Formal_Definition (дата звернення: 22.02.2022)..

52. 5G standalone architecture. Yeongtong-gu, Suwon-si Gyeonggi-do : Samsung Electronics Co., Ltd., 2021. 22 с. URL: https://images.samsung.com/is/content/samsung/assets/global/business/networks/insights/white-papers/0107_5g-standalone-architecture/5G_SA_Architecture_Technical_White_Paper_Public.pdf (дата звернення: 21.07.2023).

53. Launay F. NG-RAN and 5G-NR. 5G radio access network and radio interface : монографія. Wiley-ISTE, 2021. 288 с.

54. Худяков І. Моделі бази даних інформаційної системи моніторингу параметрів технічного стану транспортних засобів. Наукові нотатки. 2020. № 67. С. 141–148. URL: https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2019.67.22.

55. Системи захисту транспорту і вантажів (GPS / GPRS моніторинг, RFID маркування). valtek.com.ua. URL: https://valtek.com.ua/ua/system-integration/security-control-system/integrated-security-systems/protection-transport-cargo (дата звернення: 21.07.2023).

56. Gáspár P., Szalay Z., Aradi S. Highly automated vehicle system. Budapest : BME-MOGI, 2014. URL: https://www.mogi.bme.hu/TAMOP/jarmurendszerek_iranyitasa_angol/index.html (дата звернення: 21.07.2023).

57. Зведена карта покриття всіх 4G/3G операторів. mobua.net. URL: https://www.mobua.net/maps/?pos=48,31,6 (дата звернення: 21.07.2023).

58. Статистичні дані по галузі автомобільного транспорту. mtu.gov.ua. URL: https://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-po-galuzi-avtomobilnogo-transportu.html (дата звернення: 21.07.2023).

59. Степанов М., Лавріненко В. Вибір технології зв’язку елементів сенсорної мережі. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2023. № 3. С. 248–255. URL: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-30.

60. Massive MIMO for 5G networks / P. von Butovitsch та ін. Ericsson, 2023. 21 с. URL: https://www.ericsson.com/49318c/assets/local/reports-papers/white-papers/massive-mimo-for-5g-networks.pdf (дата звернення: 21.07.2023).

61. Юрасов С. Екскадрилья нових винищувачів в обмін на частоти під 5G в Україні. Або "підводні камені" на шляху до п'ятого покоління зв'язку. *dev.ua*. URL: https://dev.ua/news/5g-2022-ukraine (дата звернення: 21.07.2023).

62. Позиція Верховного суду України в постанові від 28 лютого 2023 року фактично розблокувала можливість впровадження нових радіотехнологій у смугах радіочастот 3400…3600 МГц. nkrzi.gov.ua. URL: https://nkrzi.gov.ua/index.php?r=site/index&pg=99&id=2607&language=uk (дата звернення: 21.07.2023).

63. Проектування безпроводових стільникових мереж зв’язку : навч. посіб. / уклад.: В. В. Пілінський, П. В. Попович, С. М. Веретюк. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 69 с. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/21177.

64. Райони Києва. *kyivcity.gov.ua.* URL: https://kyivcity.gov.ua/kyiv_ta_miska_vlada/pro_kyiv/raiony_kyieva/ (дата звернення: 21.07.2023).

65. Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks–with a focus on propagation models / T. S. Rappaport та ін. *IEEE transactions on antennas and propagation.* 2017. Т. 65, № 12. С. 6213–6230. URL: https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2734243..

66. Millimeter wave communications for future mobile networks / M. Xiao та ін. IEEE journal on selected areas in communications. 2017. Т. 35, № 9. С. 1909–1918. URL: https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2719924.

67. Cisco annual internet report (2018–2023). Cisco, 2020. 35 с. URL: https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html (дата звернення: 09.09.2023).

68. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work! / T. Rappaport та ін. *IEEE access*. 2013. Т. 1, № 1. С. 335–349. URL: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2013.2260813..

69. Jonathan W. Multi-gigabit microwave and millimeter-wave wireless communications. Boston : Artech House, 2010. 224 с.

70. Multi-Gigabit millimeter wave wireless communications for 5G: from fixed access to cellular networks / P. Wang та ін. *IEEE communications magazine*. № 53. С. 1–21. URL: https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7010531..

71. Yang Y., Shutler A., Grischkowsky D. Measurement of the transmission of the atmosphere from 0.2 to 2 thz. *Optics express*. № 19. С. 1–4. URL: https://doi.org/10.1364/OE.19.008830.

72. Indoor and outdoor penetration loss measurements at 73 and 81 ghz / M. Khatun та ін. *IEEE global communications conference*, м. Hawaii, 9–13 груд. 2019 р. С. 1–5. URL: https://doi.org/10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013945.

73. Perras S., Bouchard L. Fading characteristics of RF signals due to foliage in frequency bands from 2 to 60 GHz. *5th international symposium on wireless personal multimedia*

communications. proceedings, м. Honolulu, 27–30 жовт. 2002 р. 2002. С. 1–5. URL: https://doi.org/10.1109/WPMC.2002.1088174.

74. Sklar B. Digital communications: fundamentals and applications. Englewood Cliffs, N.J : Prentice-Hall, 1988. 776 с.

75. Zhang X., Andrews J. G. Downlink cellular network analysis with multi-slope path loss models. *IEEE transactions on communications*. 2014. № 63. С. 1–3. URL: https://doi.org/10.1109/TCOMM.2015.2413412.

76. The Friis Transmission Formula, Active Antenna Available Power, Reciprocity in Multiantenna Systems, and the Unnamed Power Gain / K. F. Karl F та ін. *arXiv preprint arXiv:2401.13775*. 2024. С. 1–2.

77. Кременецька Я. А., Градобоєва Н. В., Морозова С. В. Підвищення енергетичної ефективності систем міліметрового діапазону методом створення зон підсилення сигналу внаслідок дифракцій та відбивань. *Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2017.* № 3. С. 88–96.

78. Kremenetskaya Y., Markov S. Comparative analysis of interference, noise and losses in the mobile communication systems in millimeter wave range. *Computational problems of electrical engineering.* 2018. Т. 8, № 1. С. 18–24. URL: https://doi.org/10.23939/jcpee2018.01.018..

79. Bertoni H. L. Radio propagation for modern wireless systems. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall PTR, 2000. 258 с.

80. Terahertz characterisation of building materials / R. Piesiewicz та ін. Electronics letters. 2005. Т. 41, № 18. С. 1002–1004. URL: https://doi.org/10.1049/el:20052444..

81. Balanis C. A. Antenna theory: analysis and design. 3-тє вид. Wiley-Interscience, 2005. 1040 с.

82. Kremenetskaya Y. A., Liskovskiy I. O., Zhukova E. R. Quasi-optical approach to the analysis of the energy model of millimeter wave propagation and antenna characteristics. *2017 XI international conference on antenna theory and techniques (ICATT)* : матеріали конф., м. Kyiv, 24–27 трав. 2017 р. 2017. С. 394–397. URL: https://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972673.

ДОДАТОК А

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. декана радіотехнічного
факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського
д.т.н., проф.
Леонід УРИВСЬКИЙ
"__" _____2024 р.

АКТ
впровадження результатів дисертаційного дослідження в навчальний процес

Комісія у складі:
Голова – д.т.н., Ст. н. с., кафедри прикладної радіоелектроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, Степанов М.М.
Члени комісії – доц., к.т.н., Мовчанюк А.В.
доц., к.т.н., доц. Приходько І.О.,

цим Актом засвідчує, що результати дисертаційного дослідження Лавріненка Владислава Сергійовича на тему «Підвищення якості прийому сигналу в сенсорних телекомунікаційних мережах міста шляхом використання відбиття радіохвиль міліметрового діапазону» було впроваджено в навчальний процес співробітниками кафедри прикладної радіоелектроніки радіотехнічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» під час підготовки лабораторних та практичних занять з навчальної дисципліни [RE-200] «*Мультимедійні технології в радіозв'язку*» для студентів за спеціальністю 172 — «Електронні комунікації та радіотехніка».

Голова комісії
д.т.н., Ст. н. с.. Михайло СТЕПАНОВ

Члени комісії
к.т.н., доц. Андрій МОВЧАНЮК

к.т.н., доц. Ірина ПРИХОДЬКО

«4» березня 2024 р.