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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Методи забезпечення відмовостійкості в мережах мобільного зв'язку»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

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

(підпис) Олександр ЯКУБ (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-61
Олександр ЯКУБ

Керівник: Андрій ЛЕМЕШКО

Рецензент: О. Ткаченко

Київ – 2023

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія РУДЕНКО
« » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Якубу Олександру Вікторовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Методи забезпечення відмовостійкості в мережах мобільного зв'язку»,
керівник кваліфікаційної роботи Андрій ЛЕМЕШКО, PhD,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 19.10.2023 р. №145.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Технології мобільного зв'язку;
   2. Методи модуляції та мультиплексування;
   3. Методи підвищення надійності ТКС;
   4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Технології мобільного зв'язку п'ятого покоління;
   2. Методи модуляції та мультиплексування в сучасних мобільних мережах, що забезпечують надійності доставляння інформації;
   3. Дослідження методики забезпечення надійності доставляння інформації у телекомунікаційній системі.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.

6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	19.10.23	Викон.
2.	Технології мобільного зв'язку п'ятого покоління	31.10.23	Викон.
3.	Методи модуляції та мультиплексування в сучасних мобільних мережах, що забезпечують надійності доставляння інформації	15.11.23	Викон.
4.	Дослідження методики забезпечення надійності доставляння інформації у телекомунікаційній системі	29.11.23	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	11.12.23	Викон.
6.	Розробка презентації	18.12.23	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Олександр ЯКУБ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Андрій ЛЕМЕШКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 74 стор., 8 рис., 1 табл., 27 дж.

Мета роботи – дослідження технології мобільного зв'язку та методи підвищення надійності ТКС.

Об'єкт дослідження - технології мобільного зв'язку.

Предмет дослідження – методи підвищення надійності телекомунікаційних систем.

Короткий зміст роботи: У 1 розділі виконано огляд мобільних технологій попередніх поколінь (1G, 2G, 3G, 4G) та вплив технології 5G на суспільство: революція в пропускній здатності, мінімальної затримки та Інтернету речей.

Основні характеристики та відмінності 5G: швидкість передачі даних; затримка; щільність підключень; надійність зв'язку.

У 2 розділі досліджено методи модуляції та мультиплексування в сучасних мобільних мережах, що забезпечують надійності доставляння інформації.

Множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів (OFDMA), Massive MIMO — це ключова технологія для мереж 5G, яка використовує сотні чи тисячі антен для покращення продуктивності зв'язку. Технологія міліметрових хвиль (mmWave). Завдяки високій швидкості передачі даних і низькій затримці ця технологія рекламується як кардинальна гра для бездротового зв'язку.

У 3 розділі проведено аналіз стану проблеми надійнісного синтезу ТКС; дані основні характеристики і тенденції сучасного розвитку ТКС як об'єктів підвищення надійності; визначені тенденції проектування ТКС, рівень їх адекватного задоволення; викладені результати аналізу причин, принципових, що мають, характер і що не дозволяють забезпечити необхідну надійність при синтезі ТКС; обґрунтована необхідність проведення досліджень і розробок за рішенням цієї проблеми, що істотно впливає на підвищення відмовостійкості, а також ефективності функціонування таких систем на життєвому циклі; розкрита їх проблематика, що є досить новою областю теорії і практики.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: 1G, 2G, 3G, 4G, ТЕХНОЛОГІЇ 5G, ШВИДКІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ, НАДІЙНІСТЬ ЗВ'ЯЗКУ, OFDMA, MASSIVE MIMO, MMWAVE, МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТКС

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 74 pages, 8 pictures, 1 table, 27 sources.

The purpose of the work - research of mobile communication technology and methods of improving TCS reliability.

Object of research – mobile communication technologies.

Subject of research – methods of increasing the reliability of telecommunication systems.

Summary of the work: Chapter 1 provides an overview of previous generations of mobile technologies (1G, 2G, 3G, 4G) and the impact of 5G technology on society: a revolution in bandwidth, minimum latency, and the Internet of Things.

The main characteristics and differences of 5G: data transfer speed; delay; connection density; reliability of communication.

In Chapter 2, the methods of modulation and multiplexing in modern mobile networks, which ensure the reliability of information delivery, are investigated.

Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), Massive MIMO is a key technology for 5G networks that uses hundreds or thousands of antennas to improve communication performance. Millimeter wave technology (mmWave). With high data rates and low latency, this technology is being touted as a game-changer for wireless communications.

Chapter 3 analyzes the state of the problem of reliability synthesis of TCS; given the main characteristics and trends of the modern development of TCS as objects of reliability improvement; determined trends in TCS design, the level of their adequate satisfaction; the results of the analysis of the reasons, which are fundamental, which have a character, and which do not allow to ensure the necessary reliability in the synthesis of TCS are presented; the well-founded need for research and development to solve this problem, which significantly affects the increase in fault tolerance, as well as the effectiveness of the functioning of such systems during the life cycle; their problems are revealed, which is a fairly new field of theory and practice.

KEYWORDS: KEY WORDS: 1G, 2G, 3G, 4G, 5G TECHNOLOGIES, DATA TRANSMISSION SPEED, COMMUNICATION RELIABILITY, OFDMA, MASSIVE MIMO, MMWAVE, METHODS OF INCREASING TKS RELIABILITY

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

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

Направляється здобувач Якуб О.В. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Методи забезпечення відмовостійкості в мережах мобільного зв'язку

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

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

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Якуба Олександра Вікторовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Андрій ЛЕМЕШКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2023 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Якуб О.В.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувачка кафедри
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

" " _____ 2023 року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Якуба Олександра Вікторовича

на тему: «Методи забезпечення відмовостійкості в мережах мобільного зв'язку»

Актуальність:

Актуальність теми роботи полягає у постійному зростанні вимог до надійності та якості мобільних зв'язкових систем. З розвитком сучасних технологій і залученням все більшого числа користувачів, надійна та безперебійна робота мобільних мереж стає критично важливою. Забезпечення високої надійності та якості зв'язку вимагає розробки та впровадження ефективних методів, таких як резервування, механізми виявлення та відновлення помилок, оптимізація ресурсів та керування мережевим навантаженням. Дослідження та застосування нових методів підвищення надійності є ключовими для подальшого розвитку мобільних технологій та забезпечення високої якості комунікації у сучасному цифровому світі.

Позитивні сторони:

Проведені дослідження свідчать про високий науково-технічний рівень використання інформаційних технологій в даному дослідженні.

Робота викладена науковою мовою, логічно й послідовно відбиває мету та поставлені в роботі завдання. Пояснювальна записка відповідає стандартам до її оформлення.

Недоліки:

1. В роботі разом з методами мультиплексування варто розглянути методи модуляції.
2. В роботі не розглянуто недоліки методів забезпечення надійності мобільних мереж зв'язку.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно», а здобувач Якуб Олександр Вікторович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Рецензент: к.т.н., доц. каф. ІПЗАС _____ Оксана Тимченко

(науковий ступінь, вчене звання) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 9
ВСТУП 10
1 ТЕХНОЛОГІЇ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ 12
1.1 Огляд мобільних технологій попередніх поколінь (1G, 2G, 3G, 4G) 12
1.2 Вплив технології 5G на суспільство: революція в пропускній здатності, мінімальної затримки та Інтернету речей 19
2 МЕТОДИ МОДУЛЯЦІЇ ТА МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ В СУЧАСНИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ НАДІЙНОСТІ ДОСТАВЛЯННЯ ІНФОРМАЦІЇ 28
2.1 Множинний доступ з ортогональним частотним поділом в 4G та 5G 28
2.2 Масиви антен MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 34
2.3 Технології mmWave у мережах 5G 40
3 Дослідження методики забезпечення надійності доставляння інформації у телекомунікаційній системі 49
3.1 Системний підхід до надійнісного проектування ТКС 49
3.2 Методи підвищення надійності 62
ВИСНОВКИ 71
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 73
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 75

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G	Fifth Generation
AMPS	Advanced Mobile Phone System
CDMA	Code Division Multiple Access
GSM	Global System for Mobile Communications
IoT	Internet of Things
LTE	Long-Term Evolution
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
MIoT	Massive Internet of Things
MIMO	Multiple Input Multiple Output
mmWave	Millimeter waves
MU-MIMO	Multiple User Multiple Input Multiple Output
RAN	Radio Access Network
TACS	Total Access Communication System
TCP/IP	Transmission Control Protocol/ Internet Protocol
TD-SCDMA	Time Division Multiple Access
UP	User Plane
QoS	Quality of Service
VoLTE	Voice over LTE
ТКС	Телекомунікаційна система

ВСТУП

Мережі мобільного зв'язку стали невід'ємною частиною нашого повсякденного життя, забезпечуючи постійний доступ до інформації та зв'язку. Однак ці мережі не захищені від збоїв або збоїв, які можуть призвести до збоїв у роботі та втрати зв'язку. Тому вкрай важливо впровадити механізми відмовостійкості для забезпечення безперервності обслуговування.

Актуальність теми пояснюється рядом факторів, пов'язаних із швидким розвитком інформаційних технологій та зростаючими вимогами сучасного суспільства до мобільного зв'язку. Розглянемо ключові аспекти, які обумовлюють актуальність цієї теми:

1. Високі вимоги до швидкості передачі даних: З розвитком 5G технологій, швидкість передачі даних зростає в десятки разів порівняно з попередніми поколіннями мереж. Це вимагає надійного забезпечення доставляння інформації, щоб користувачі могли в повній мірі використовувати можливості 5G.

2. Розширення застосувань та сервісів: 5G мережі розраховані на обслуговування широкого спектра застосувань, які вимагають різних характеристик, таких як низька затримка, висока пропускна спроможність, масове підключення пристроїв та енергоефективність. У зв'язку з цим, забезпечення надійності доставляння інформації стає критично важливим.

3. Інтернет речей (IoT): З поширенням IoT та розумних міст, кількість пристроїв, які вимагають підключення до мережі, стрімко зростає. Враховуючи величезну кількість пристроїв та різноманітність їх вимог до якості обслуговування, забезпечення надійності доставляння інформації стає важливою задачею для 5G мереж.

4. Робота в критичних умовах: 5G мережі повинні забезпечувати надійну роботу в критичних умовах, таких як автономні транспортні засоби, екстрені служби та промислові системи управління. Забезпечення надійності доставляння інформації в таких ситуаціях є вирішальним для забезпечення безпеки, ефективності та стабільності цих систем.

5. Запобігання перешкодам і втратам: Оскільки мережі 5G використовують високі частоти для передачі даних, вони можуть бути чутливішими до перешкод та втрат сигналу. Відповідно, розробка методів забезпечення надійності доставляння інформації є важливою складовою під час проектування та впровадження 5G мереж.

З урахуванням цих аспектів, актуальність обраної теми полягає в тому, що відповідність цим вимогам є критично важливою для успішного функціонування сучасних телекомунікаційних систем та задоволення потреб користувачів в ефективному та безпечному обміні інформацією.

Мета роботи – дослідження технології мобільного зв'язку та методи підвищення надійності ТКС.

Об'єкт дослідження - технології мобільного зв'язку.

Предмет дослідження – методи підвищення надійності телекомунікаційних систем.

1 ТЕХНОЛОГІЇ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

1.1 Огляд мобільних технологій попередніх поколінь (1G, 2G, 3G, 4G)

З початком ери мобільного зв'язку та його стрімким розвитком на протязі останніх декількох десятиліть, ми стали свідками еволюції технологій та послуг, що надавалися користувачам. Цей процес розвитку можна розглядати через кілька поколінь мобільних технологій, кожне з яких пропонувало нові можливості та значно покращувало якість зв'язку та функціональність мобільних пристроїв. У даному розділі ми проведемо огляд мобільних технологій попередніх поколінь (1G, 2G, 3G, 4G), розглянемо їх особливості та відмінності, що допоможе нам краще зрозуміти та оцінити поточний стан та перспективи розвитку мобільного зв'язку [1] (рис. 1.1).

Features	1G	2G	3G	4G	5G
Introduced	1979	1991	2001	2010	2019
Technology	AMPS, TACS	GSM	WCDMA	WiMAX, LTE	MIMO
Frequency	800-900 MHz	1.8 GHz	2 GHz	1800 MHz	24-47 GHz
Internet Service	Normal	Narrow band	Broad band	Ultra Broadband	Wireless World Wide Web
Net Speed	2.4 Kbps	64 Kbps	2 Mbps	1 Gbps	10 Gbps
Application	Voice call	Voice call, short message	Video call, GPS, MMS	Video call, GPS, mobile TV	HD video, robots.

Рис. 1.1. Технології мобільного зав'язку

Підводячи підсумки огляду мобільних технологій попередніх поколінь, можна сказати, що з кожним наступним поколінням ми спостерігали значне покращення швидкості передачі даних, якості зв'язку та збільшення кількості доступних послуг. Це свідчить про неперервний процес розвитку та інновацій у галузі мобільного зв'язку, який продовжується і сьогодні, надаючи користувачам нові можливості та забезпечуючи більш ефективне використання ресурсів мобільних мереж. У світлі цих змін можна очікувати, що наступні покоління

мобільних технологій продовжать розширювати границі комунікації та підвищувати якість життя людей у всьому світі.

Перше покоління мобільного зв'язку, відоме як 1G, з'явилося на початку 1980-х років і стало першим кроком на шляху до створення світової мобільної комунікаційної системи. Воно було значним проривом в телекомунікаційній галузі, оскільки дозволило користувачам здійснювати дзвінки з портативних телефонів, без потреби в підключенні до наземних телефонних ліній [2].

1G-технології базувалися на аналоговому радіозв'язку, що дозволило передавати голосові даних через радіохвилі. Однією з найвідоміших 1G-систем була Advanced Mobile Phone System (AMPS), що з'явилася у Сполучених Штатах. В Європі, на зміну системі NMT, прийшла система TACS (Total Access Communication System). 1G-мережі були популярними у свій час, але мали ряд обмежень.

По-перше, якість звуку у 1G-системах була низькою через аналогову природу передачі даних. Розмови могли бути спотворені або втрачені через перешкоди, такі як будівлі та природні перешкоди. По-друге, системи 1G використовували велику кількість радіочастотного спектра, що обмежувало кількість одночасних користувачів та підвищувало рівень інтерференції.

Зрештою, захист приватності був недостатнім, оскільки аналогові радіохвилі легко можна було перехопити або прослухати. Це призвело до розвитку технологій, спрямованих на поліпшення якості зв'язку та забезпечення конфіденційності комунікацій.

Незважаючи на недоліки 1G-технологій, вони стали основою для розвитку більш вдосконалених технологій мобільного зв'язку. Важливо визнати їхній внесок у сучасні комунікаційні системи, оскільки саме завдяки ним зародилась ідея переносного зв'язку. З часом 1G-технології поступалися місцем наступним поколінням мобільних технологій - 2G, 3G та 4G - що розширили функціонал мобільного зв'язку і забезпечили збільшення якості та швидкості передачі даних.

Мобільні технології другого покоління, відомі як 2G, з'явилися на рубежі 1990-х років як відповідь на обмеження та проблеми, пов'язані з 1G-системами.

Відрізняючись від своїх аналогових попередників, 2G-технології використовували цифрову модуляцію для передачі голосу та даних, що значно поліпшило якість звуку, забезпечення приватності та ефективність використання радіочастотного спектра [3].

Однією з найвідоміших 2G-систем була Global System for Mobile Communications (GSM), яка стала стандартом для мобільного зв'язку в більшості країн світу. Вона забезпечувала користувачам покращену якість голосових дзвінків, вищий рівень безпеки та додаткові послуги, такі як SMS-повідомлення та передача даних на низьких швидкостях.

Друге покоління мобільного зв'язку також відзначалося появою роумінгу, який дозволяв користувачам використовувати свої мобільні телефони в інших країнах, не змінюючи свій номер телефону. Це значно спростило міжнародні комунікації та розширило можливості для бізнесу та особистих відносин.

Однак 2G-технології мали свої обмеження. Швидкість передачі даних була досить низькою, що перешкоджало розвитку інтернет-послуг та мультимедійних додатків на мобільних пристроях. Також, з ростом кількості користувачів та запиту на передачу даних, мережі 2G стикалися з проблемами пропускної здатності та недостатньо ї ефективності ресурсів, що призводило до перевантаження та відмов мережі.

Незважаючи на ці обмеження, 2G-технології зіграли важливу роль у розвитку мобільного зв'язку, створивши основу для сучасних стандартів та послуг. Вони поклали початок епохи масового використання мобільних телефонів, перетворивши їх з рідкісних портативних пристроїв на необхідні аксесуари для щоденного життя людей по всьому світу.

У свою чергу, поява та розповсюдження 2G-мереж спонукали вчених та інженерів шукати нові шляхи для поліпшення якості зв'язку, швидкості передачі даних та забезпечення стабільності мережі. Ці зусилля призвели до створення наступного покоління мобільних технологій - 3G, які вже базувалися на більш вдосконалених принципах та стандартах, відкривши двері до нових можливостей та інновацій у сфері мобільних комунікацій.

Третє покоління мобільних технологій, відоме як 3G, виникло на рубежі двох століть, як результат розвитку комунікаційних систем та пошуку відповіді на нові потреби користувачів. Завдяки значному прогресу в галузі технологій та інновацій, 3G забезпечило значне поліпшення якості зв'язку, швидкості передачі даних та нові можливості для користувачів мобільного зв'язку [4] (рис. 1.2).

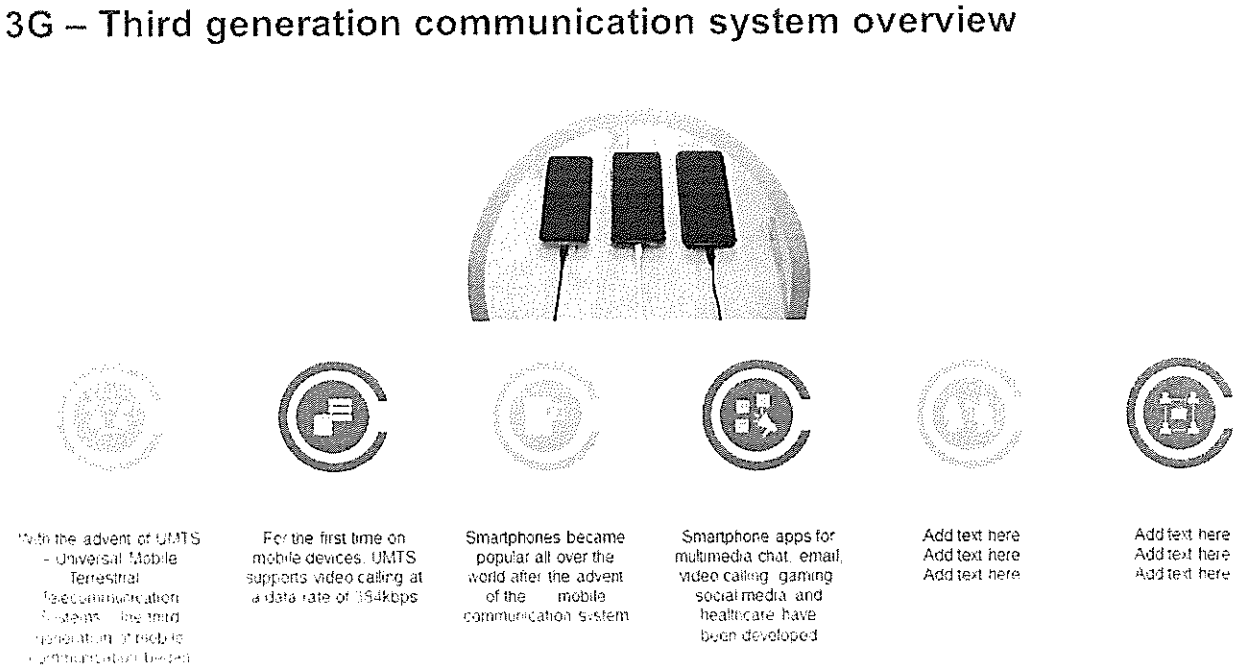


Рис. 1.2. Технології мобільного зав'язку 3G

Одним із ключових аспектів 3G було введення широкосмугового інтернету в мобільні пристрої. Це дало користувачам можливість отримати доступ до веб-сайтів, мультимедіа та електронної пошти безпосередньо з мобільного телефона. Крім того, з'явилися нові послуги, такі як передача мультимедійних повідомлень (MMS), відео-дзвінки та стрімінг відео.

Впровадження 3G базувалося на ряді стандартів, таких як UMTS, CDMA2000 та TD-SCDMA. Завдяки цьому, мобільні оператори змогли забезпечити кращі умови зв'язку, забезпечуючи більшу покриття мережі та стабільність сигналу. Також 3G підвищило ємність мережі, що дозволило підтримувати більшу кількість користувачів одночасно.

Однак, 3G мало свої обмеження. Передусім, швидкість передачі даних у 3G була досить низькою за сучасними стандартами, зазвичай досягаючи максимум 20 Мбіт/с. Хоча це було значним поліпшенням порівняно з попередніми поколіннями мобільного зв'язку, вимоги користувачів та відповідні аплікації продовжували рости, в вимагаючи від мобільних технологій ще швидшої передачі даних та більшої пропускної здатності.

Також, 3G мережі були досить витратними для розгортання та обслуговування, особливо у регіонах з низькою густотою населення, що знижувало стимул для телекомунікаційних компаній вкладати в покращення інфраструктури. З іншого боку, зростання кількості користувачів та їх потреб спонукало операторів до подальшого розвитку мобільних технологій, що призвело до появи наступного покоління - 4G.

Підсумовуючи, 3G стало значним кроком у розвитку мобільних технологій, відкриваючи нові можливості для користувачів та послуг, таких як широкосмуговий інтернет, відеозв'язок та мультимедійні повідомлення. Впровадження 3G дозволило більшому числу людей отримати доступ до глобальної мережі й забезпечити комунікацію в режимі реального часу, що поклало початок новим епохам соціальних мереж та мобільних додатків. Однак, саме цей постійний розвиток технологій та зростання вимог користувачів спонукали промисловість до винайдення та впровадження наступних поколінь мобільного зв'язку, які продовжують розвиватися на сьогоднішній день.

Огляд мобільних технологій 4G. Мобільні технології продовжують розвиватися з кожним поколінням, відповідаючи на зростаючі потреби та вимоги користувачів. 4G (четверте покоління) мобільного зв'язку стало відповіддю на необхідність ще швидшого, ефективнішого та надійнішого зв'язку порівняно з попереднім поколінням 3G [5].

Технологія 4G була розроблена з метою забезпечення широкосмугового доступу до інтернету з мобільних пристроїв, що передбачало підтримку високої якості передачі мультимедійного контенту, відео- та аудіозв'язків, а також стабільного використання різноманітних додатків. 4G використовує передові

технології, такі як LTE (Long-Term Evolution) та WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), що забезпечують значне покращення швидкості передачі даних порівняно з 3G (рис. 1.3).

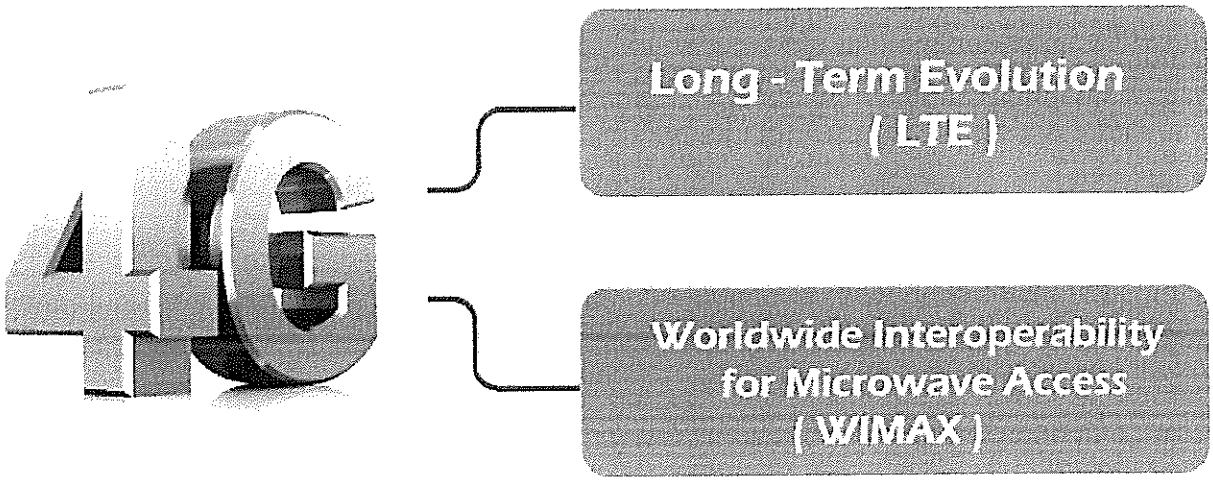


Рис. 1.3. LTE та WiMAX – представники технології 4G

Однією з особливостей мобільних технологій 4G є висока швидкість передачі даних і підключення до Інтернету. З 4G користувачі можуть насолоджуватися швидкістю завантаження до 100 Мбіт/с, що значно вище, ніж швидкість, яку пропонує 3G. 4G також пропонує розширені мультимедійні та потокові послуги, що дозволяє користувачам дивитися високоякісне відео та слухати високоякісне аудіо на своїх мобільних пристроях. Крім того, 4G пропонує покращену пропускну здатність і надійність мережі, гарантуючи, що користувачі можуть залишатися на зв'язку навіть у місцях із високим трафіком мережі.

Мобільні технології 4G мають численні застосування та переваги, включаючи мобільну комерцію та послуги електронних платежів. Завдяки 4G користувачі можуть здійснювати платежі та проводити транзакції безпечно та зручно зі своїх мобільних пристроїв. 4G також полегшує соціальні медіа та цифровий маркетинг, дозволяючи компаніям ефективніше охоплювати цільову

аудиторію. Крім того, 4G забезпечує віддалену роботу та телеконференції, що полегшує людям роботу та співпрацю з будь-якої точки світу.

Однією з ключових особливостей 4G є підтримка MIMO (Multiple Input Multiple Output) та OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) технологій, які дозволяють ефективно використовувати ресурси радіочастотного спектру та забезпечувати високу пропускну здатність. 4G мережі також пропонують вдосконалені функції Quality of Service (QoS) та енергоефективність, що покращують користувацький досвід та довговічність батареї мобільних пристроїв.

Запровадження 4G мереж сприяло поширенню нових послуг та додатків, таких як голосовий зв'язок через VoLTE (Voice over LTE) та збільшення швидкості передачі даних для відео- та аудіо-стрімінгу, групових відеозв'язків, мобільних ігор з високою якістю графіки та інших ресурсоємних додатків. Це сприяло зростанню глобального мобільного інтернет-трафіку та перетворенню мобільних пристроїв на відповідні інструменти для роботи, розваг і соціального взаємодії.

Мобільні технології 4G революціонізували наш спосіб спілкування та взаємодії один з одним. Завдяки високій швидкості передачі даних, розширеним мультимедійним послугам і покращеній пропускній здатності мережі 4G відкрив нові можливості для мобільного зв’язку та надав численні програми та переваги.

Тем не менш, на даний момент виникає потреба у розвитку наступного покоління мобільного зв'язку - 5G. Це пояснюється зростаючими вимогами користувачів до якості зв'язку, надійності передачі даних та необхідністю підтримки нових рішень у сфері Інтернету речей (IoT), автономних транспортних засобів та передачі великого обсягу даних.

В цілому, 4G мобільний зв'язок забезпечив значні покращення у передачі даних, швидкості та стабільності зв'язку порівняно з попередніми поколіннями. Це дозволило користувачам отримувати більш якісний досвід від використання мобільних пристроїв та сприяло розвитку нових додатків та послуг. Однак

постійний технологічний розвиток та зростаючі потреби користувачів створюють основу для виникнення наступного покоління мобільного зв'язку - 5G [6].

1.2 Вплив технології 5G на суспільство: революція в пропускній здатності, мінімальної затримки та Інтернету речей

Світ стоїть на порозі технологічної революції, яка обіцяє змінити спосіб нашого життя, роботи та спілкування. Технологія 5G є одним із найбільш очікуваних подій у технологічній індустрії, і вона збирається революціонізувати спосіб використання наших пристроїв і підключення до Інтернету. Розглянемо визначення технології 5G, чим вона відрізняється від попередніх поколінь стільникових мереж, переваги технології 5G і потенційний вплив технології 5G на Інтернет речей (IoT) (рис. 1.4).

Впровадження технології 5G змінить спосіб спілкування та підключення один до одного. Завдяки вищій швидкості Інтернету та зменшеній затримці користувачі можуть розраховувати на більш плавну та ефективну роботу. Ця технологія дозволить використовувати нові технології, такі як доповнена реальність і віртуальна реальність, які можуть революціонізувати такі галузі, як освіта, охорона здоров'я та розваги. Наприклад, лікарі зможуть дистанційно проводити операції за допомогою доповненої реальності, а студенти зможуть відвідувати віртуальні аудиторії з будь-якої точки світу. Крім того, збільшення потужності для передачі даних дозволить Інтернету речей (IoT) стати більш поширеним. IoT — це мережа пристроїв, підключених до Інтернету, таких як розумні будинки, переносні пристрої та автономні транспортні засоби. Завдяки технології 5G ці пристрої зможуть ефективніше спілкуватися один з одним, створюючи більш взаємопов'язаний світ.

Очікується, що вплив технології 5G на галузі та економіку буде значним. Підвищення ефективності та продуктивності в таких галузях, як виробництво та транспорт, призведе до економії коштів і покращення продуктивності.

Наприклад, автономні транспортні засоби зможуть спілкуватися один з одним у режимі реального часу, що призведе до більш безпечного та ефективного транспортування. Впровадження технології 5G також створить нові можливості для бізнесу та джерела доходу. Наприклад, компанії зможуть розробляти нові продукти та послуги, які використовують розширені можливості підключення та передачі даних технології 5G. Це призведе до створення робочих місць та економічного зростання. Однак існує занепокоєння щодо можливого переміщення робочих місць і змін на ринку праці. Оскільки галузі стають більш автоматизованими та ефективними, деякі роботи можуть застаріти, що призведе до безробіття та нерівності доходів.

Хоча переваги технології 5G очевидні, є також занепокоєння щодо її впливу на суспільство. Однією з найбільших проблем є конфіденційність і безпека. Зі збільшенням обсягу передачі та збору даних існує ризик скомпрометації особистої інформації. Це може призвести до крадіжки особистих даних, фінансового шахрайства та інших кіберзлочинів. Ще одним занепокоєнням є цифровий розрив і нерівний доступ до технології 5G. У той час як очікується, що міські райони матимуть широкий доступ до технології 5G, сільські райони можуть залишитися позаду. Це може посилити існуючу нерівність і створити дворівневе суспільство. Нарешті, існують проблеми зі здоров'ям, пов'язані з підвищеним впливом електромагнітного випромінювання, хоча наукове співтовариство розділилося щодо потенційного впливу технології 5G на здоров’я.

Технологія 5G - це останнє покоління стільникових мереж, яке обіцяє вищу швидкість Інтернету, меншу затримку та можливість підключати більше пристроїв, ніж будь-коли раніше. На відміну від попередніх поколінь стільникових мереж, технологія 5G використовує комбінацію високочастотного та низькочастотного діапазонів для передачі даних. Це дозволяє мережам 5G забезпечувати вищу швидкість і більшу пропускну здатність, ніж попередні покоління стільникових мереж. Крім того, технологія 5G використовує передову

технологію антени для покращення потужності сигналу та зменшення перешкод, що забезпечує більш надійне з'єднання [6, 7].

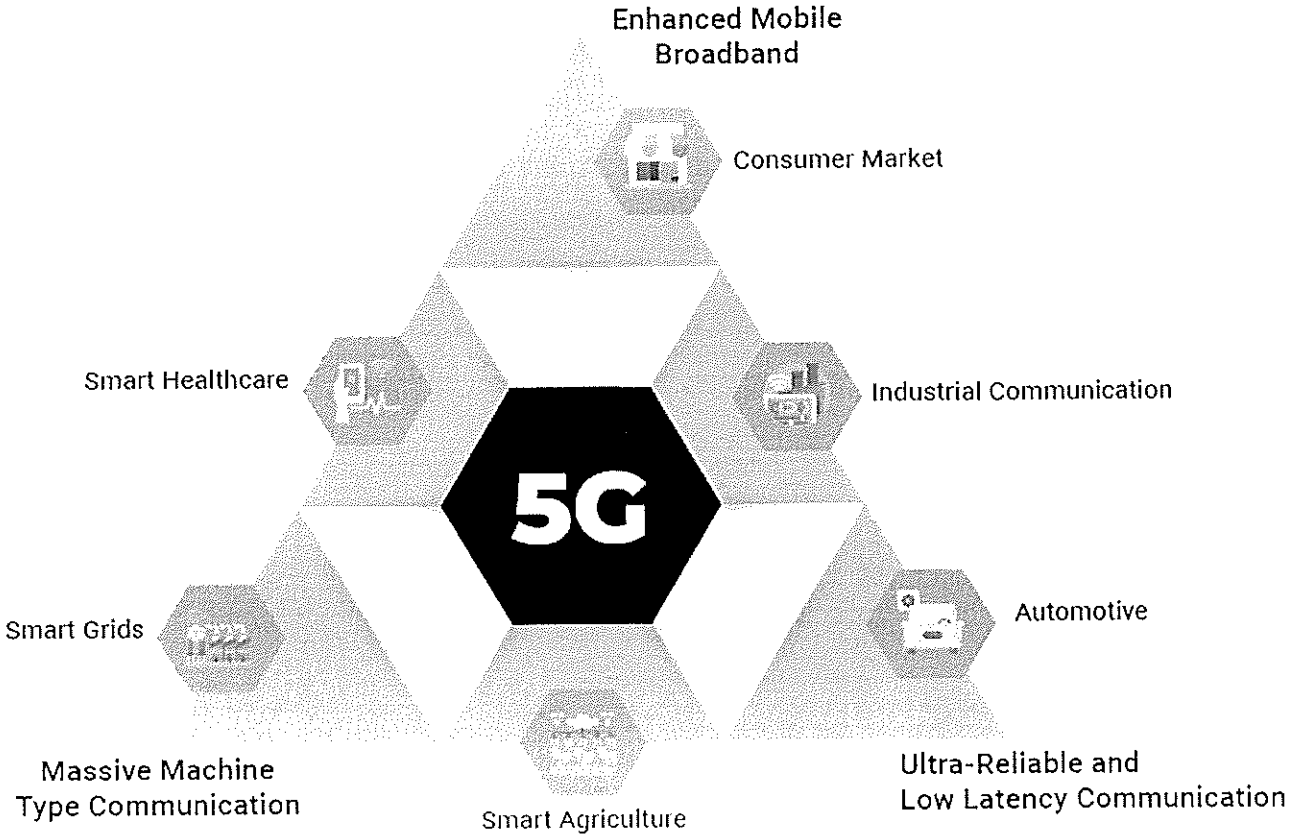


Рис. 1.4. Особливості технології 5G

Переваги технології 5G численні та далекосяжні. Однією з найважливіших переваг технології 5G є збільшена пропускна здатність і швидкість Інтернету. Завдяки технології 5G користувачі можуть розраховувати на швидкість Інтернету, яка в 100 разів перевищує швидкість поточних мереж 4G. Це означає, що користувачі можуть завантажувати великі файли, транслювати високоякісні відео та грати в онлайн-ігри з мінімальною буферизацією та затримкою. Ще однією перевагою технології 5G є зменшена затримка, що означає, що пристрої будуть більш чуйними та швидше реагуватимуть на введення даних користувача. Це особливо важливо для додатків, які потребують передачі даних у реальному часі, таких як дистанційна хірургія чи автономні транспортні засоби.

Основні характеристики та відмінності 5G [8, 9]:

1. Швидкість передачі даних:

Однією з ключових відмінностей 5G від попередніх поколінь мобільного зв'язку є значне покращення швидкості передачі даних. Згідно зі стандартами 5G, швидкість передачі даних може досягати 20 Гбіт/с, що в десятки разів вище, ніж в мережах 4G (1 Гбіт/с). Це дозволяє користувачам відтворювати відео високої якості без затримок, проводити відеоконференції в реальному часі та обмінюватися великими обсягами даних миттєво.

2. Затримка:

Затримка, або пінг, є важливим параметром мобільних мереж, особливо для таких застосунків, як ігри, автономні транспортні засоби та медичні системи. 5G пропонує значне зниження затримки порівняно з попередніми поколіннями, досягаючи рівня від 1 мс. Така низька затримка дозволяє реалізувати передачу даних в режимі реального часу та підтримувати високу якість роботи застосунків, що вимагають миттєвої взаємодії.

3. Щільність підключень:

Ще однією ключовою особливістю 5G є підвищення щільності підключень. Мережі 5G можуть підтримувати до 1 мільйона підключених пристроїв на км^2, що в десятки разів вище порівняно з мережами 4G. Це забезпечує стійку роботу мобільних мереж у густонаселених місцях, таких як міста та стадіони, а також дозволяє широке впровадження Інтернету речей (IoT) та смарт-міст. Висока щільність підключень 5G сприяє створенню нових інноваційних рішень та послуг, які залежать від надійного зв'язку в умовах великої кількості пристроїв.

4. Надійність зв'язку:

5G пропонує високу надійність зв'язку порівняно з попередніми поколіннями мобільних технологій. Завдяки розвинутій інфраструктурі та застосуванню нових технологій, таких як Massive MIMO та Beamforming, мережі 5G забезпечують стабільний зв'язок навіть в умовах високої завантаженості мережі. Висока надійність зв'язку 5G критично важлива для таких сфер, як телемедицина, автономний транспорт та промисловість, де неуспішна передача даних може призвести до небезпечних наслідків.

Основні характеристики та відмінності 5G, такі як покращена швидкість передачі даних, знижена затримка, підвищена щільність підключень та надійність зв'язку, відкривають нові можливості для користувачів та розвитку інноваційних технологій. У майбутньому, з розвитком 5G, можна очікувати появи нових застосунків та послуг, які значно покращать якість життя людей та забезпечать розвиток суспільства на новому технологічному рівні.

Потенційний вплив технології 5G на Інтернет речей (IoT) є значним. IoT відноситься до мережі пристроїв, датчиків і машин, які підключені до Інтернету та можуть спілкуватися один з одним. Завдяки технології 5G можна буде підключати до Інтернету мільярди пристроїв і датчиків, створюючи величезну мережу взаємопов'язаних пристроїв. Це дозволить розробляти нові додатки та послуги, які раніше були неможливі, такі як розумні міста, автономні заводи та віддалена охорона здоров'я. Крім того, технологія 5G дозволить кільком пристроям одночасно підключатися до Інтернету, що підвищить ефективність і швидкість передачі даних [10].

Вплив технології 5G на охорону здоров'я величезний. Завдяки можливості підключати більше пристроїв і датчиків до Інтернету постачальники медичних послуг можуть віддалено контролювати пацієнтів і надавати більш ефективну допомогу. Наприклад, дистанційне спостереження за пацієнтами та телемедицина стануть доступнішими та надійнішими, що дозволить постачальникам медичних послуг надавати допомогу пацієнтам, які не можуть доїхати до клініки чи лікарні. Крім того, технологія 5G дозволить постачальникам медичних послуг збирати та аналізувати величезні обсяги даних пацієнтів, що може призвести до більш персоналізованого та ефективного лікування. Нарешті, технологія 5G також може розширити можливості для компаній зі збору й аналізу даних, що призведе до нових ідей і прогресу в дослідженнях у сфері охорони здоров'я.

Вплив технології 5G на транспорт також є значним. Завдяки можливості підключати більше пристроїв до Інтернету, технологія 5G може підвищити надійність і безпеку критично важливих програм для охорони здоров'я.

Наприклад, автономні транспортні засоби можуть спілкуватися один з одним і з системами керування дорожнім рухом у режимі реального часу, що сприяє більш ефективним і безпечним транспортам. Крім того, технологія 5G може забезпечити дистанційний моніторинг пацієнтів, дозволяючи постачальникам медичних послуг контролювати життєво важливі функції пацієнтів і надавати допомогу в режимі реального часу, навіть коли пацієнти перебувають у русі. Загалом технологія 5G має потенціал кардинально змінити спосіб подорожей і надання медичних послуг.

Вплив технології 5G на освіту також значний. Завдяки можливості підключати більше пристроїв до Інтернету, технологія 5G може покращити підключення та надійність автономних транспортних засобів, що призведе до покращеного керування трафіком та безпеки. Крім того, технологія 5G може забезпечити дистанційне навчання та віртуальні класи, дозволяючи студентам отримувати доступ до освітніх ресурсів з будь-якої точки світу. Це може призвести до більш справедливого доступу до освіти та покращення освітніх результатів для учнів. Загалом технологія 5G може революціонізувати спосіб навчання та доступу до освітніх ресурсів.

Потенційний вплив технології 5G на економіку є значним. Завдяки можливості підключати більше пристроїв до Інтернету, технологія 5G може покращити доступ до освітніх ресурсів і забезпечити дистанційне навчання та віртуальні класи. Це може призвести до більш справедливого доступу до освіти та покращення освітніх результатів для студентів, що може призвести до більш кваліфікованої робочої сили та підвищення продуктивності. Крім того, технологія 5G може створювати нові галузі та можливості працевлаштування, що веде до економічного зростання та розвитку. Загалом, технологія 5G має потенціал трансформувати спосіб нашої роботи та навчання, що призведе до більш процвітаючого та справедливого суспільства.

Незважаючи на численні переваги технології 5G, є також деякі проблеми з її впровадженням. Однією з найбільших проблем є необхідність значного оновлення інфраструктури. Технологія 5G вимагає щільної мережі невеликих

стільників і антен для забезпечення надійного покриття, розгортання якої може бути дорогим і трудомістким. Крім того, існує занепокоєння щодо потенційних підвищених ризиків для кібербезпеки, оскільки все більше пристроїв і датчиків підключено до Інтернету. Однак переваги технології 5G, такі як підвищення продуктивності та ефективності бізнесу, значно переважують потенційні виклики [11].

Глобальна гонка за впровадження технології 5G розпалюється, а країни по всьому світу змагаються за лідерство в цій критично важливій технології. Сполучені Штати, Китай і Південна Корея належать до країн, які інвестують значні кошти в технологію 5G з метою отримання конкурентної переваги в глобальній економіці. Проте є занепокоєння щодо можливого нового цифрового розриву, оскільки країни, які повільніше впроваджують технологію 5G, можуть залишитися позаду. Крім того, існує занепокоєння щодо потенційних підвищених ризиків для кібербезпеки, оскільки все більше пристроїв і датчиків підключено до Інтернету. Загалом, глобальна гонка за впровадження технології 5G має стати одним із визначальних технологічних змагань 21-го століття.

Майбутнє технології 5G сповнене можливостей і невизначеностей. Одним з потенційних наслідків домінування 5G є геополітичні наслідки, які це може мати. Країни, які є лідерами в технологіях 5G, можуть мати значну перевагу з точки зору економічного зростання та розвитку, що може призвести до зростання конкуренції та напруги між країнами. Крім того, постійні інновації та розвиток технології 5G можуть призвести до появи нових програм і послуг, які ми поки що не можемо собі уявити. Однак, як і з будь-яким технологічним прогресом, існують також етичні міркування, які слід враховувати.

Етичні міркування технології 5G є складними та багатогранними. Оскільки технологія 5G продовжує розвиватися та стає все більш поширеною, це матиме значні наслідки для майбутніх технологічних досягнень і суспільних змін. Наприклад, збільшення обсягу збору даних, пов'язане з технологією 5G, викликає значні проблеми щодо конфіденційності. Оскільки все більше пристроїв і датчиків підключаються до Інтернету, існує ризик того, що особисті

дані можуть збиратися та використовуватися без згоди. Крім того, існує ризик того, що технологія 5G може посилити існуючу соціально-економічну нерівність, оскільки доступ до мереж 5G може бути обмежений для тих, хто може собі це дозволити.

Вплив технології 5G на навколишнє середовище є ще одним важливим фактором. Оскільки все більше пристроїв і датчиків підключаються до Інтернету, існує ризик значного збільшення споживання енергії. Це може мати значні екологічні наслідки, такі як збільшення викидів вуглецю та виснаження ресурсів. Крім того, розвиток технології 5G може призвести до зростання соціально-економічної нерівності, оскільки доступ до мереж 5G може бути обмежений для тих, хто може собі це дозволити. Загалом слід ретельно враховувати вплив технології 5G на навколишнє середовище та суспільство, коли ми просуваємося вперед із її впровадженням.

Роль уряду та регулювання у розгортанні 5G має вирішальне значення для забезпечення стійкої інфраструктури та балансу потреби в інноваціях і громадськості безпеки. Уряд повинен відігравати значну роль у регулюванні впровадження технології 5G, щоб забезпечити її відповідальне та стійке впровадження. Це включає забезпечення довговічності та екологічності інфраструктури. Крім того, уряд повинен збалансувати потребу в інноваціях із проблемами громадської безпеки, такими як кібербезпека та конфіденційність. Важливо мати нормативну базу, яка заохочує інновації, водночас захищаючи громадськість.

Вплив технології 5G на глобальний зв'язок і співпрацю є значним. Він має потенціал для покращення міжнародного співробітництва, забезпечуючи швидший і надійніший зв'язок між країнами та організаціями. Проте вкрай важливо забезпечити справедливий доступ і конкуренцію, щоб уникнути створення нового цифрового розриву. Країни повинні працювати разом, щоб гарантувати, що технологія 5G буде доступною для всіх, і створювати рівні умови для компаній і організацій [12].

На завершення, технологія 5G має змінити спосіб життя, роботи та спілкування. Він обіцяє забезпечити більш високу швидкість Інтернету, меншу затримку та можливість підключати більше пристроїв, ніж будь-коли раніше. Переваги технології 5G численні та далекосяжні, від покращення охорони здоров'я та транспорту до покращення освіти та економіки. Однак впровадження технології 5G також створює значні проблеми, такі як необхідність значної модернізації інфраструктури та вирішення етичних міркувань. Роль уряду та регулювання у розгортанні 5G має вирішальне значення для забезпечення стійкої інфраструктури та балансу між потребою в інноваціях і громадською безпекою. Загалом технологія 5G має потенціал для з'єднання людей та організацій у всьому світі, що призведе до значних соціальних змін і прогресу. Однак важливо відповідально ставитися до цього та ретельно розглядати потенційні виклики.

2 МЕТОДИ МОДУЛЯЦІЇ ТА МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ В СУЧАСНИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ НАДІЙНОСТІ ДОСТАВЛЯННЯ ІНФОРМАЦІЇ

2.1 Множинний доступ з ортогональним частотним поділом в 4G та 5G

Множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів (OFDMA) є ключовою технологією сучасного бездротового зв'язку, яка використовується як у мережах 4G, так і в 5G. OFDMA дозволяє кільком користувачам спільно використовувати одну частотну смугу, розділяючи її на менші піднесучі, забезпечуючи ефективну передачу та прийом даних. У цьому розділі ми розглянемо основи OFDMA, його використання в мережах 4G і 5G, його переваги перед іншими методами множинного доступу та його вплив на ефективність спектру [13].

OFDMA — це метод множинного доступу, який використовує комбінацію частотного поділу та часового поділу, щоб дозволити кільком користувачам використовувати один і той же діапазон частот. Він працює шляхом поділу смуги частот на менші піднесучі, кожна з яких містить частину даних, а потім призначає кожну піднесучу іншому користувачеві. Це дозволяє кільком користувачам одночасно передавати та отримувати дані, не заважаючи один одному. OFDMA пропонує кілька переваг перед іншими методами множинного доступу, включаючи вищу спектральну ефективність, покращену пропускну здатність і кращу стійкість до перешкод (рис. 2.1).

OFDMA широко використовується в мережах 4G, де він став стандартною технікою множинного доступу. У мережах 4G OFDMA використовується в низхідній лінії зв'язку (від базової станції до користувача) для передачі даних кільком користувачам одночасно. Використання OFDMA в мережах 4G принесло кілька переваг, включаючи вищу швидкість передачі даних, покращене покриття та кращу якість обслуговування. Приклади мереж 4G, які використовують OFDMA, включають LTE і WiMAX.

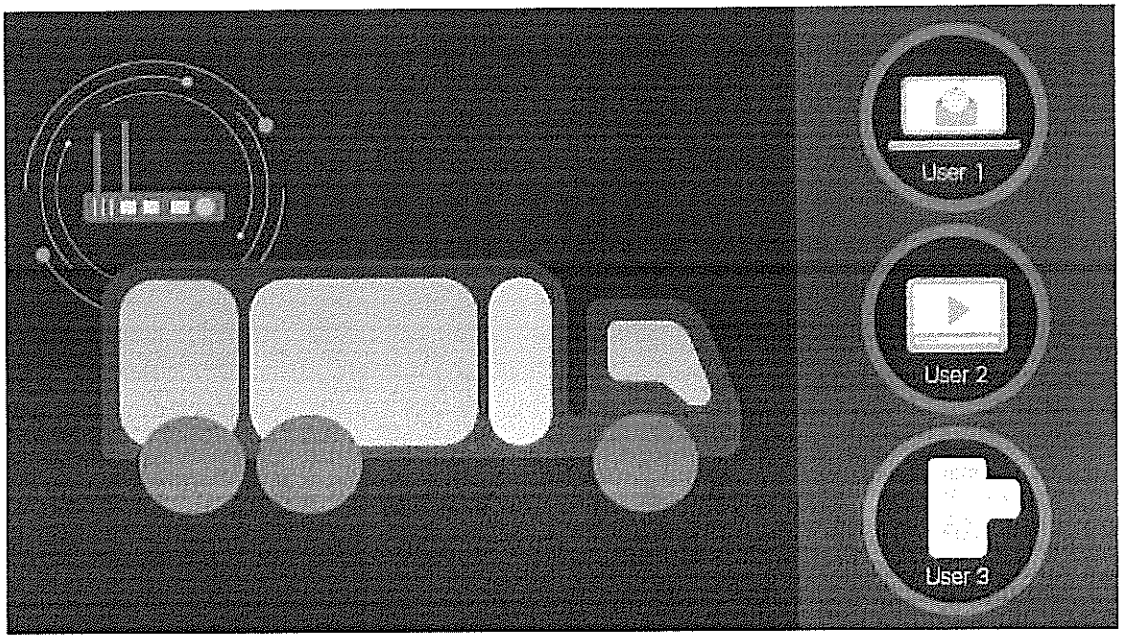


Рис. 2.1. Технологія OFDMA

OFDMA також є ключовою технологією в мережах 5G, де вона використовується як у висхідній лінії зв'язку (від користувача до базової станції), так і в низхідній лінії зв'язку. У мережах 5G OFDMA було вдосконалено для підтримки більшої смуги пропускання, більшої кількості піднесучих і розширених схем модуляції. Це дозволяє мережам 5G досягати вищої швидкості передачі даних, меншої затримки та кращої надійності, ніж мережі 4G. Однак існують деякі відмінності між OFDMA в мережах 4G і 5G, включаючи використання коротшого інтервалу піднесучих і більш просунутих схем модуляції в 5G.

OFDMA часто порівнюють з іншими методами множинного доступу, такими як множинний доступ з кодовим розділенням (CDMA).) і множинний доступ з розділенням часу (TDMA). У порівнянні з CDMA, OFDMA пропонує вищу спектральну ефективність, кращу стійкість до перешкод і простішу конструкцію приймача. Порівняно з TDMA, OFDMA пропонує вищу ємність, кращу гнучкість і кращу підтримку змінних швидкостей передачі даних. Проте OFDMA має певні обмеження порівняно з іншими методами, включаючи вищий коефіцієнт пікової та середньої потужності та нижчий опір частотно-вибірковому завмиранню [13].

OFDMA є ключовою технологією для підвищення ефективності спектру в бездротовому зв'язку. Розділивши смугу частот на менші піднесучі, OFDMA дозволяє декільком користувачам спільно використовувати одну смугу частот, не заважаючи один одному, таким чином підвищуючи спектральну ефективність. Це має важливі наслідки для бездротового зв'язку, оскільки дозволяє більшій кількості користувачів використовувати той самий діапазон частот, збільшуючи пропускну здатність і знижуючи вартість розгортання та обслуговування бездротових мереж. Приклади OFDMA, що покращують ефективність використання спектру в мережах 4G і 5G, включають використання агрегації несучих і динамічного спільного використання спектру.

OFDMA відіграє вирішальну роль у збільшенні швидкості передачі даних у бездротовому зв'язку. Розділивши смугу частот на менші піднесучі, OFDMA дозволяє більш ефективно використовувати доступну смугу пропускання, що призводить до вищих швидкостей передачі даних. Це особливо важливо в умовах сучасного бездротового зв'язку, де програми, що потребують великих даних, такі як потокове передавання відео та онлайн-ігри, стають все більш популярними. Вищі швидкості передачі даних також забезпечують швидше завантаження та завантаження, зменшуючи затримку та покращуючи загальну якість обслуговування. Приклади збільшення швидкості передачі даних OFDMA в мережах 4G і 5G включають використання розширених схем модуляції, формування променя та технології MIMO (багато входів і виходів).

OFDMA також ефективний в управлінні перешкодами в бездротовому зв'язку. Перешкоди можуть виникати, коли кілька користувачів використовують один і той же діапазон частот, що призводить до зниження якості сигналу та швидкості передачі даних. OFDMA керує перешкодами, призначаючи різні піднесучі різним користувачам, гарантуючи, що вони не заважають один одному. Це покращує загальну якість обслуговування та зменшує ймовірність припинення дзвінків або втрати даних. Приклади OFDMA для керування перешкодами в мережах 4G і 5G включають використання контролю потужності, стрибків частоти та методів усунення перешкод.

OFDMA також використовується для розподілу ресурсів у бездротовому зв'язку. Розділивши смугу частот на менші піднесучі, OFDMA забезпечує більш ефективний розподіл ресурсів, таких як потужність і пропускна здатність. Це покращує загальну пропускну здатність мережі та дозволяє обслуговувати більше користувачів одночасно. OFDMA також підтримує динамічний розподіл ресурсів, що дозволяє мережі адаптуватися до мінливих умов трафіку та вимог користувачів. Приклади розподілу ресурсів OFDMA в мережах 4G і 5G включають використання блоків ресурсів, індикаторів якості каналів і алгоритмів планування.

OFDMA розроблено для забезпечення мобільності користувачів у бездротовому зв'язку. Коли користувачі переміщуються, мережа повинна гарантувати, що вони залишаються на зв'язку, а їхні дані передаються й приймаються без перерв. OFDMA досягає цього, підтримуючи швидку передачу між базовими станціями та використовуючи передові методи керування мобільністю, такі як формування променя та MIMO. Це покращує загальну взаємодію з користувачем і зменшує ймовірність припинення дзвінків або втрати даних. Приклади OFDMA, що обробляють мобільність користувачів у мережах 4G і 5G, включають використання формування променя, алгоритмів передачі даних і передових антенних систем.

OFDMA має значний вплив на архітектуру мережі в бездротовому зв'язку. Завдяки підтримці кількох користувачів і ефективному використанню доступної смуги пропускання OFDMA дозволяє розгортати більш ефективні та рентабельні бездротові мережі. OFDMA також підтримує використання малих стільників, тобто менших і більш численних базових станцій, які можна розгортати в районах з високою щільністю користувачів, покращуючи покриття та пропускну здатність. Крім того, OFDMA дозволяє використовувати нарізку мережі, що дозволяє створювати віртуальні мережі з різними характеристиками та вимогами. Приклади впливу OFDMA на мережеву архітектуру в мережах 4G і 5G включають використання малих комірок, нарізку мережі та хмарну архітектуру RAN (мережі радіодоступу) [14].

OFDMA відіграє вирішальну роль у забезпеченні якості обслуговування в бездротовому зв'язку. Забезпечуючи ефективне використання доступної смуги пропускання, OFDMA дозволяє мережі визначати пріоритети передачі даних на основі вимог користувача та умов трафіку. Це гарантує, що користувачі отримають необхідну пропускну здатність і швидкість передачі даних для своїх додатків, покращуючи загальну взаємодію з користувачем. Приклади OFDMA, що забезпечують якість обслуговування в мережах 4G і 5G, включають використання параметрів QoS (якість обслуговування), диференціацію трафіку та механізми контролю доступу.

OFDMA має значний вплив на затримку в бездротовому зв'язку. Забезпечуючи швидшу та ефективнішу передачу даних, OFDMA зменшує затримку, покращуючи загальну взаємодію з користувачем. Це особливо важливо для додатків, які потребують передачі даних у реальному часі, таких як відеоконференції та онлайн-ігри. Приклади OFDMA, що зменшують затримку в мережах 4G і 5G, включають використання передових схем модуляції, формування променя та технології MIMO.

OFDMA також покращує енергоефективність бездротового зв'язку. Розділивши смугу частот на менші піднесучі, OFDMA дозволяє мережі більш ефективно розподіляти ресурси, зменшуючи споживання енергії. Це має важливі наслідки для розгортання та обслуговування бездротових мереж, оскільки зменшує вартість і вплив бездротового зв'язку на навколишнє середовище. Приклади OFDMA, що покращують енергоефективність у мережах 4G і 5G, включають використання режимів сну, керування живленням і динамічний розподіл ресурсів.

OFDMA вирішує питання безпеки в бездротовому зв'язку, підтримуючи механізми шифрування та автентифікації. Призначаючи різні піднесучі різним користувачам, OFDMA також зменшує ймовірність прослуховування та перехоплення. Це покращує загальну безпеку бездротового зв'язку та захищає користувачів від несанкціонованого доступу та крадіжки даних. Приклади OFDMA, що вирішують питання безпеки в мережах 4G і 5G, включають

використання алгоритмів шифрування, механізмів безпечного обміну ключами та протоколів автентифікації.

Майбутнє OFDMA багатообіцяюче, з потенційними розробками та прогресом у технології. Вони включають використання передових схем модуляції, таких як 1024-QAM, і розгортання масивних систем MIMO. Також очікується, що OFDMA відіграватиме ключову роль у майбутніх системах бездротового зв'язку, таких як 6G, де вона забезпечить вищу швидкість передачі даних, меншу затримку та кращу енергоефективність. Однак у майбутньому OFDMA також існують проблеми та обмеження, такі як потреба в більш ефективних підсилювачах потужності та зростаючий попит на ресурси спектру.

На завершення, OFDMA є ключовою технологією сучасного бездротового зв'язку, яка використовується в мережах 4G і 5G. Це дозволяє кільком користувачам спільно використовувати одну частотну смугу, розділяючи її на менші піднесучі, забезпечуючи ефективну передачу та прийом даних. OFDMA пропонує кілька переваг перед іншими методами множинного доступу, включаючи вищу спектральну ефективність, покращену пропускну здатність і кращу стійкість до перешкод. Це також має значний вплив на ефективність використання спектру, швидкість передачі даних, керування перешкодами, розподіл ресурсів, мобільність користувачів, архітектуру мережі, якість обслуговування, затримку, енергоефективність і безпеку. Майбутнє OFDMA багатообіцяюче, з потенційними розробками та прогресом у технології, але існують також проблеми та обмеження, які необхідно вирішити. Загалом, OFDMA є критично важливою технологією сучасного бездротового зв'язку, яка забезпечує швидшу, ефективнішу та надійнішу передачу даних, покращуючи загальну взаємодію з користувачем.

2.2 Масиви антен MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

П'яте покоління (5G) бездротового зв'язку обіцяє революціонізувати спосіб підключення до навколишнього світу. Однією з ключових технологій, що забезпечує цю трансформацію, є Multiple-Input Multiple-Output (технологія MIMO дозволяє використовувати кілька антен як на передавач, так і на приймачі, надаючи значні переваги перед традиційними системами з одним входом і одним виходом (SISO). Досліджуватимемо визначення, історичну історію, антену та просторове мультиплексування, моделі каналів і методи рознесення MIMO в контексті 5G. система, яка використовує кілька антен як на передавальній, так і на приймальній сторонах для покращення продуктивності зв'язку [15].

У системі MIMO дані передаються та приймаються через кілька антен, які можна використовувати для збільшення швидкості передачі даних, покращення якості сигналу та зменшення перешкод. Технологія MIMO є суттєвим удосконаленням у порівнянні з системами SISO, які використовують лише одну антену як на передавачі, так і на приймачі. Ця технологія має кілька переваг, зокрема збільшену пропускну здатність, краще покриття та покращену надійність. Історична довідка технології MIMO має свої бере свій початок у перші дні бездротового зв'язку, але лише наприкінці 1990-х років він почав набирати обертів. Розвиток технології MIMO був зумовлений необхідністю покращити пропускну здатність і надійність систем бездротового зв'язку. Ранні системи MIMO використовували лише кілька антен, але з розвитком технології стало можливим використовувати десятки або навіть сотні антен.

Сьогодні технологія MIMO є ключовою технологією для систем бездротового зв'язку 5G. Технологія MIMO базується на використанні кількох антен як на передавачі, так і на приймачі для покращення продуктивності зв'язку. Існує кілька типів MIMO-антен, включаючи однокористувацьку MIMO (SU-MIMO), багатокористувацьку MIMO (MU-MIMO) і масивну MIMO (рис. 2.2). Просторове мультиплексування є ще однією ключовою особливістю технології MIMO, яка дозволяє передавати кілька потоків даних одночасно в одному

діапазоні частот. Це досягається шляхом використання кількох антен для створення кількох просторових каналів, які можна використовувати для передачі різних потоків даних. Моделі каналів MIMO використовуються для опису поведінки каналу бездротового зв'язку в системі MIMO. Існує кілька типів моделей каналів MIMO, включаючи модель завмирання Релея, модель просторової кореляції та модель кластерного розсіювання.

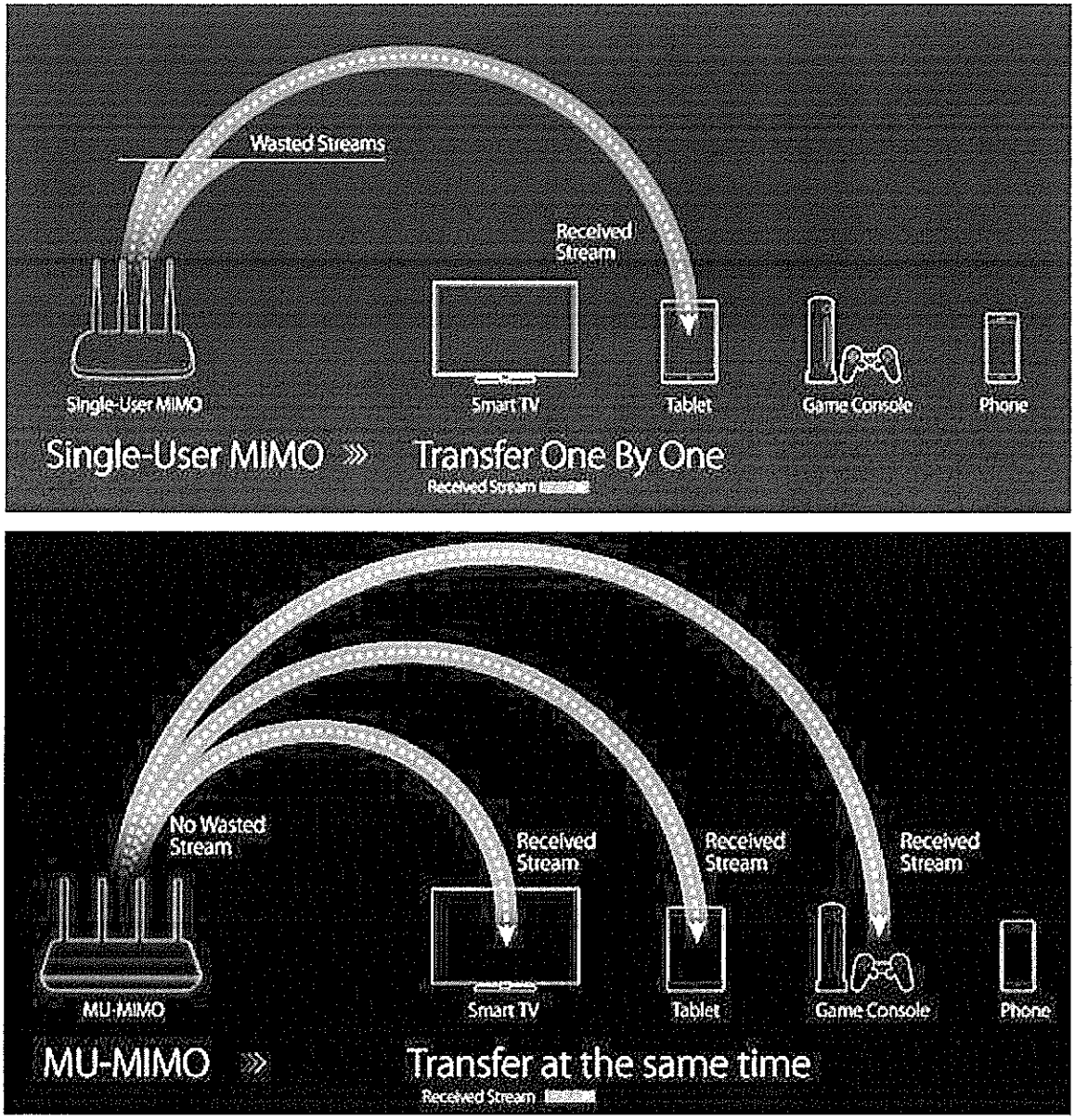


Рис. 2.2. Технологія MIMO та MU-MIMO

Канали MIMO мають кілька характеристик, включаючи просторову кореляцію, пропускну здатність каналу та рознесення каналів. Ці характеристики

мають вирішальне значення для розуміння продуктивності систем MIMO в різних середовищах. Методи рознесення використовуються в системах MIMO для покращення продуктивності зв'язку за наявності завмирання та перешкод. У системах MIMO використовуються кілька типів методів рознесення, включаючи просторово-часове кодування, формування променя та попереднє кодування.

Технології рознесення забезпечують декілька переваг, зокрема підвищену надійність, покращене покриття та зменшення перешкод. Ці методи необхідні для досягнення високих швидкостей передачі даних і низької затримки, необхідних для систем бездротового зв'язку 5G. Технологія MIMO значною мірою покладається на методи обробки сигналів для покращення продуктивності зв'язку. Методи обробки сигналів, що використовуються в MIMO, включають формування променя, попереднє кодування та просторово-часове кодування. Ці методи використовуються для покращення якості сигналу, зменшення перешкод і збільшення швидкості передачі даних.

Застосування методів обробки сигналів у MIMO включає бездротові локальні мережі, стільникові мережі та супутникові системи зв'язку. Методи обробки сигналів є важливими для досягнення високої швидкості передачі даних і низької затримки, необхідних для систем бездротового зв'язку 5G. Метрики для оцінки продуктивності систем MIMO включають пропускну здатність каналу, частоту бітових помилок і ймовірність відключення. Фактори, що впливають на продуктивність систем MIMO, включають кількість антен, відстань між антенами та умови каналу. Продуктивність систем MIMO можна покращити за допомогою методів рознесення, методів обробки сигналів і передових схем кодування.

Ці фактори мають вирішальне значення для оцінки продуктивності систем MIMO в різних середовищах. 5G — це п'яте покоління технології бездротового зв'язку, яка обіцяє забезпечити вищу швидкість передачі даних, меншу затримку та краще покриття, ніж попередні покоління. Мережі 5G характеризуються високою швидкістю передачі даних, низькою затримкою та масивним підключенням. Мережі 5G створять нові програми, такі як автономні транспортні

засоби, розумні міста та віртуальна реальність. Очікується, що розгортання мереж 5G прискорить впровадження технології MIMO.

Технологія MIMO відіграє вирішальну роль у мережах 5G. Технологія MIMO забезпечує вищу швидкість передачі даних, краще покриття та покращену надійність у мережах 5G. Технологія MIMO необхідна для досягнення високих швидкостей передачі даних і низької затримки, необхідних для мереж 5G. Переваги технології MIMO, такі як методи просторового мультиплексування та рознесення, роблять її критично важливою технологією для мереж 5G. Технології MIMO, що використовуються в мережах 5G, включають масивне MIMO, формування променя та попереднє кодування.

Massive MIMO — це ключова технологія для мереж 5G, яка використовує сотні чи тисячі антен для покращення продуктивності зв'язку. Формування променя та попереднє кодування – це методи обробки сигналу, які використовуються в мережах 5G для покращення якості сигналу та зменшення перешкод. Очікується, що прогрес у технології MIMO, такий як гібридне формування променя та інтелектуальні відбиваючі поверхні, ще більше покращить продуктивність MIMO в мережах 5G [15].

У мережах 5G антени MIMO відіграють вирішальну роль у покращенні продуктивності зв'язку. Massive MIMO — це найпоширеніший тип антени MIMO в мережах 5G, який використовує сотні або тисячі антен для покращення продуктивності зв'язку. Формування променя є ще однією ключовою особливістю технології MIMO, що використовується в мережах 5G, яка використовує методи обробки сигналу для фокусування передачі в певному напрямку.

Методи формування променя, що використовуються в мережах 5G, включають аналогове формування променя, цифрове формування променя та гібридне формування променя. Моделі каналів, які використовуються в мережах 5G, мають вирішальне значення для розуміння поведінки каналу бездротового зв'язку. Найпоширенішими моделями каналів у мережах 5G є моделі каналів 3GPP, які включають міські макромоделі, міські мікро- та сільські макромоделі.

Характеристики каналів 5G включають масивний MIMO, частоти mmWave і формування променя. Ці характеристики мають вирішальне значення для досягнення високих швидкостей передачі даних і низької затримки, необхідних для мереж 5G. Показники, які використовуються для оцінки продуктивності MIMO в мережах 5G, включають пропускну здатність каналу, спектральну ефективність і співвідношення сигнал/шум.

Фактори, що впливають на продуктивність MIMO в мережах 5G, включають умови каналів, відстань між антенами та кількість антен. Продуктивність MIMO в мережах 5G можна покращити за допомогою передових методів обробки сигналів, таких як формування променя та попереднє кодування. Впровадження MIMO в мережах 5G створює кілька проблем, зокрема потребу в масивному MIMO, високу вартість апаратного забезпечення MIMO та складність алгоритмів обробки сигналів.

Рішення для подолання цих проблем включають використання гібридного формування променя, розширені алгоритми обробки сигналів і розробку недорогого апаратного забезпечення MIMO. Майбутнє MIMO в мережах 5G багатообіцяюче, у технології MIMO очікується кілька досягнень. Ці досягнення включають використання інтелектуальних поверхонь, що відбивають, передові методи формування променя та розробку недорогого апаратного забезпечення MIMO. Потенційні застосування MIMO в майбутніх мережах 5G включають автономні транспортні засоби, розумні міста та віртуальну реальність [16].

Переваги MU-MIMO:

1. Збільшена пропускна здатність: MU-MIMO дозволяє базовій станції одночасно обслуговувати кілька користувачів, що збільшує загальну пропускну здатність мережі та покращує якість зв'язку для кожного користувача.

2. Краще використання радіочастотного спектру: Завдяки одночасному передаванню даних до кількох користувачів, MU-MIMO забезпечує ефективніше використання доступного радіочастотного спектру, зменшуючи інтерференцію та забезпечуючи стабільніший зв'язок.

3. Зменшення затримки: Оскільки MU-MIMO дозволяє одночасну передачу даних до кількох користувачів, затримка в мережі знижується, що важливо для додатків, які вимагають реального часу, таких як геймінг або VoIP.

Недоліки MU-MIMO:

1. Обмеженість сумісності: MU-MIMO працює лише з пристроями, які підтримують цю технологію. Якщо користувачі використовують пристрої без підтримки MU-MIMO, їхній зв'язок не буде мати користі від переваг технології.

2. Вплив на пропускну здатність при віддаленому користуванні: MU-MIMO ефективно працює на коротких відстанях, але якщо користувачі знаходяться далеко від точки доступу, пропускна здатність може суттєво знижуватись.

3. Складність реалізації: Щоб отримати максимальні переваги від MU-MIMO, необхідно налаштувати систему, що може бути складним для деяких користувачів та адміністраторів мережі.

4. Додаткові витрати: Оскільки MU-MIMO є новішою технологією. Додаткові витрати: Оскільки MU-MIMO є новішою технологією, пристрої, які її підтримують, можуть мати вищу вартість порівняно з пристроями без підтримки MU-MIMO. Це може стати причиною додаткових витрат для користувачів, які хочуть модернізувати свої мережі та пристрої.

Враховуючи переваги та недоліки MU-MIMO, можна зрозуміти, що ця технологія пропонує значні покращення для бездротових мереж, особливо коли йде мова про підтримку багатокористувацьких сценаріїв та ефективне використання радіочастотного спектру. Проте, як і з будь-якою технологією, важливо розглянути його обмеження та можливі витрати, перш ніж прийняти рішення про інвестування у відповідне обладнання та інфраструктуру.

На завершення, технологія MIMO є критично важливою технологією для мереж 5G. Технологія MIMO надає кілька переваг перед традиційними системами SISO, включаючи підвищену ємність, краще покриття та підвищену надійність. Використання антен MIMO, просторового мультиплексування, методів рознесення, алгоритмів обробки сигналів і методів формування променя є важливими для досягнення високих швидкостей передачі даних і низької

затримки, необхідних для мереж 5G. Незважаючи на те, що впровадження MIMO в мережах 5G створює кілька проблем, майбутнє MIMO в мережах 5G багатообіцяюче, з деякими досягненнями, які очікуються в технології MIMO.

2.3 Технології mmWave у мережах 5G

Поява мереж 5G принесла з собою безліч нових технологій, однією з яких є технологія міліметрових хвиль (mmWave). Завдяки високій швидкості передачі даних і низькій затримці ця технологія рекламується як кардинальна гра для бездротового зв'язку. Розглянемо основи технології mmWave, її роль у мережах 5G і важливість дизайну антени для її розгортання. 1 і 10 міліметрів. Цей діапазон частот потрапляє в діапазон високих частот, який є вищим, ніж традиційний діапазон частот мікрохвиль [13, 16] (рис. 2.3). Спектр міліметрових хвиль — це смуга спектру між 30 ГГц і 300 ГГц.

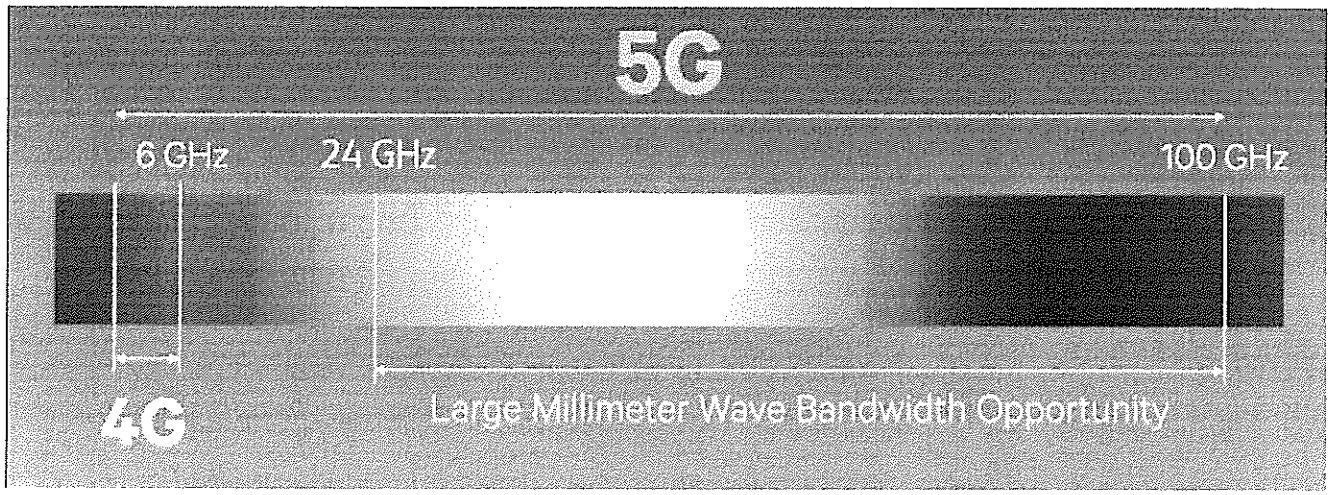


Рис. 2.3. Технологія міліметрових хвиль

Раніше цього року Тед Раппапорт, директор-засновник NYU Wireless, сказав, що трафік мобільних даних щорічно зростатиме на 53% у «осяжному майбутньому», а за останні 40 років тактова частота комп'ютера та розмір пам'яті зросли на цілих шість порядків величини. Нам потрібен вищий частотний спектр,

щоб пристосуватися до зростання використання даних, і одне з найбільших і найважливіших застосувань міліметрових хвиль – це передача великих обсягів даних.

Технологія mmWave стала перспективним рішенням для високошвидкісної передачі даних і додатків із малою затримкою. Ця технологія працює в діапазоні частот міліметрових хвиль, який набагато вищий, ніж традиційні діапазони радіочастот, які використовуються для зв'язку. Унікальні технічні характеристики технології mmWave дозволили їй запропонувати низку переваг перед традиційними технологіями зв'язку. Однак існують також проблеми та обмеження, які необхідно вирішити, щоб повністю реалізувати потенціал технології mmWave.

Однією з ключових технічних характеристик технології mmWave є частотний діапазон і пропускна здатність. Частотний діапазон, який використовується для зв'язку мм хвиль, зазвичай лежить між 30 ГГц і 300 ГГц, що набагато вище, ніж у традиційних діапазонах зв'язку. Цей діапазон високих частот забезпечує більшу смугу пропускання, що, у свою чергу, забезпечує вищу швидкість передачі даних. Конструкція антени та формування променя також є важливими компонентами технології mmWave. Використання спрямованих антен і методів формування променя дозволяє краще фокусувати сигнал і покращити співвідношення сигнал/шум. Крім того, поширення та проникнення сигналу також є важливими факторами для технології mmWave. Завдяки високочастотному діапазону сигнали mmWave мають обмежений діапазон і легко блокуються такими перешкодами, як будівлі та дерева.

Використання технології mmWave пропонує кілька переваг перед традиційними технологіями зв'язку. Однією з найважливіших переваг є висока швидкість передачі даних, якої можна досягти. Завдяки більшій смузі пропускання та покращеному фокусуванню сигналу технологія mmWave може підтримувати швидкість передачі даних у декілька гігабітів на секунду. Крім того, технологія mmWave має низьку затримку та високу пропускну здатність, що робить її ідеальною для додатків, які потребують передачі даних у реальному

часі, таких як віртуальна реальність і доповнена реальність. Крім того, технологія mmWave може підтримувати декілька пристроїв і програм одночасно, що робить її універсальним рішенням для різних випадків використання.

Незважаючи на переваги технології mmWave, існують також проблеми та обмеження, які необхідно вирішити. Однією з головних проблем є обмежений діапазон і покриття хвильових сигналів. Завдяки високочастотному діапазону сигнали mmWave мають обмежений діапазон і легко блокуються такими перешкодами, як будівлі та дерева. Крім того, сигнали mmWave вразливі до факторів навколишнього середовища, таких як дощ і листя, що може ще більше обмежити їх діапазон і покриття. Іншою проблемою є вищі витрати на впровадження та вимоги до обладнання, пов'язані з технологією mmWave. Через потребу в спрямованих антенах і методах формування променя вимоги до апаратного забезпечення технології mmWave складніші та дорожчі, ніж традиційні технології зв'язку.

Технологія mmWave характеризується здатністю передавати великі обсяги даних на високій швидкості з низькою затримкою. Однак ця технологія має певні обмеження, такі як її малий радіус дії та чутливість до перешкод від фізичних об'єктів. Порівняно з іншими технологіями бездротового зв'язку, технологія mmWave пропонує вищі швидкості передачі даних, ніж традиційні мікрохвильові діапазони частот, але має менший радіус дії.

Отже, mmWave характеризується своїми унікальними технічними характеристиками, перевагами та проблемами. Високий частотний діапазон і більша смуга пропускання технології mmWave забезпечують високу швидкість передачі даних і низьку затримку, що робить її перспективним рішенням для різних застосувань. Однак обмежений діапазон і охоплення, вразливість до факторів навколишнього середовища та вищі витрати на впровадження – це деякі з проблем, які необхідно вирішити, щоб повністю реалізувати потенціал технології mmWave. У міру продовження досліджень і розробок очікується, що технологія mmWave стане ширше впроваджена та інтегрована в різні галузі промисловості та застосування.

Мережі 5G розроблено для забезпечення швидшої швидкості передачі даних, меншої затримки та більшої пропускної здатності мережі, ніж попередні бездротові мережі. комунікаційні технології. Для досягнення цих цілей архітектура мереж 5G вимагає використання технології mmWave.

Технологія MmWave пропонує кілька переваг у задоволенні потреб мереж 5G, наприклад її здатність передавати великі обсяги даних на високій швидкості з низькою затримкою. Однак розгортання технології mmWave у мережах 5G було проблематичним через її малий радіус дії та чутливість до перешкод від фізичних об'єктів. Антени відіграють вирішальну роль у розгортанні технології mmWave у мережах 5G. Типи антен, які використовуються в мм-хвильовому зв'язку, включають спрямовані антени та антени з діаграмою спрямованості. Спрямовані антени використовуються для фокусування передачі сигналів у певному напрямку, тоді як діаграми спрямованості використовуються для створення певної діаграми спрямованості. Вибір конструкції антени може істотно вплинути на продуктивність мережі.

Наприклад, спрямовані антени можна використовувати для подолання обмежень малої радіусу дії технології mmWave, тоді як антени, що формують діаграму спрямованості, можна використовувати для пом'якшення впливу перешкод від фізичних об'єктів. Одним із завдань технології mmWave є поширення сигналу на високих частотах. Ці хвилі мають меншу довжину хвилі, що робить їх більш сприйнятливими до ослаблення та блокування фізичними об'єктами. Ця проблема призвела до розробки моделей каналів mmWave, які описують характеристики каналу та те, як сигнали поширюються через нього.

Моделі каналів враховують такі фактори, як середовище, характеристики антени та частота сигналу. Для покращення поширення сигналу та покриття були запропоновані різні методи, такі як формування променя, масивна MIMO та ретрансляційні мережі. Федеральна комісія зв'язку (FCC) у Сполучених Штатах виділила кілька діапазонів міліметрових хвиль для комерційного використання, у тому числі діапазони 24 ГГц, 28 ГГц і 39 ГГц. Ці діапазони були розділені на менші діапазони частот і продані з аукціону телекомунікаційним компаніям [16].

Міжнародні стандарти та правила щодо частоти міліметрових хвиль залежать від країни. Доступність спектру є вирішальним фактором у розгортанні технології mmWave. Обмежена доступність спектру може призвести до посилення конкуренції та підвищення витрат для телекомунікаційних компаній. Розгортання технології mmWave призвело до змін у дизайні та розгортанні мережі.

Архітектура малих комірок використовується для забезпечення покриття в міських районах, тоді як макростільники використовуються в сільській місцевості. Інтеграція технологій mmWave і sub-6GHz використовується для забезпечення покриття більшої території. Використання технології mmWave також призвело до покращення затримки мережі, пропускної здатності та надійності. Однак розгортання технології mmWave все ще перебуває на ранніх стадіях, і ще є проблеми, які потрібно подолати, наприклад вартість розгортання та доступність спектру.

Як і будь-яка технологія бездротового зв'язку, зв'язок mmWave вразливий до різних погрози та напади. Деякі з уразливостей і загроз у мережах mmWave включають прослуховування, перешкоди та перешкоди сигналу. Короткий діапазон зв'язку mmWave також робить його вразливим до фізичних атак, таких як блокування сигналу фізичними об'єктами. Ризики конфіденційності, пов'язані зі зв'язком mmWave, включають перехоплення конфіденційних даних і відстеження місцезнаходження користувачів.

Щоб зменшити ці ризики, були розроблені протоколи та стандарти безпеки, такі як стандарти безпеки IEEE 802.11ad і 5G. Ці протоколи та стандарти забезпечують такі засоби захисту, як шифрування, автентифікація та контроль доступу, щоб захистити дані та забезпечити конфіденційність користувачів. Комерційне використання технології mmWave у мережах 5G має потенціал для революції в різних галузях. Наприклад, використання технології mmWave може покращити продуктивність пристроїв IoT, які потребують високої швидкості передачі даних і низької затримки.

У індустрії AR/VR технологія mmWave може забезпечити передачу високоякісного відео та аудіо, що є важливим для захоплюючого досвіду. В автомобільній промисловості використання технології mmWave може покращити продуктивність автономних транспортних засобів, забезпечуючи зв'язок у режимі реального часу між транспортними засобами та інфраструктурою. Комерційне використання технології mmWave також представляє різні бізнес-моделі та можливості для отримання прибутку для телекомунікаційних компаній, наприклад продаж спектру mmWave, обладнання та послуг [17].

Розвиток технології mmWave все ще знаходиться на ранніх стадіях, і є багато простору для інновацій і досліджень. Однією з тенденцій у мм-хвильовому зв'язку є використання формування променя, що забезпечує спрямовану передачу сигналів. Іншою тенденцією є використання масивного MIMO, який передбачає використання кількох антен для покращення потужності та якості сигналу. Дослідницькі питання та можливості технології mmWave включають розробку нових моделей каналів, покращення поширення сигналу та покриття, а також інтеграцію технологій mmWave та суб-6 ГГц. Потенційний вплив технології mmWave на майбутній бездротовий зв'язок є значним, і очікується, що вона зіграє вирішальну роль у розвитку мереж 6G. Кілька країн успішно впровадили технологію mmWave у своїх мережах 5G.

У Сполучених Штатах Verizon і AT&T розгорнули технологію mmWave у різних містах, надаючи своїм клієнтам високошвидкісний Інтернет. У Південній Кореї SK Telecom, KT і LG Uplus також розгорнули технологію mmWave, забезпечуючи високошвидкісний Інтернет для своїх клієнтів у містах. Японія та Китай також почали розгортати технологію mmWave у своїх мережах 5G. Ключові фактори успішного розгортання mmWave включають доступність спектру, вартість розгортання та здатність подолати обмеження малої дальності технології mmWave. Розгортання в реальному світі показало, що використання малих комірок і формування променя може значно покращити покриття та продуктивність мереж mmWave.

Уроки, отримані під час розгортання в реальному світі, включають необхідність ретельного планування та оптимізації мережі, важливість конструкції антени та необхідність співпраці між телекомунікаційними компаніями та державними установами. Ці уроки можуть допомогти в майбутньому розгортати технологію mmWave у мережах 5G. Розгортання технології mmWave у мережах 5G може бути дорогим, вимагаючи встановлення нової інфраструктури та придбання спектру.

Аналіз витрат і вигод розгортання mmWave залежить від таких факторів, як доступність спектру, вартість розгортання та комерційна життєздатність технології. Порівняно з частотою нижче 6 ГГц та іншими бездротовими технологіями, технологія mmWave пропонує вищу швидкість передачі даних і меншу затримку, що робить її ідеальною для таких програм, як автономні транспортні засоби та AR/VR.

Однак обмеження малої дальності технології mmWave можуть збільшити вартість розгортання, оскільки для забезпечення покриття певної території потрібно більше малих стільників. Вплив витрат на розгортання на комерційну життєздатність може бути значним, оскільки телекомунікаційним компаніям необхідно збалансувати вартість розгортання та потенційний дохід від технології. Наявність спектра та державні субсидії також можуть відігравати важливу роль у комерційній життєздатності технології mmWave.

Здатність інтегрувати технологію mmWave з мережами, не пов'язаними з 5G, дає кілька переваг, наприклад, можливість надавати високошвидкісний Інтернет у регіонах де покриття 5G недоступне. Однак існують також проблеми, пов'язані з інтеграцією, такі як потреба в новій інфраструктурі та можливість виникнення перешкод між різними бездротовими технологіями.

Потенційні варіанти використання гібридних мереж включають використання технології mmWave для забезпечення високошвидкісного Інтернету в містах, тоді як технологія нижче 6 ГГц використовується в сільській місцевості. Інтеграція технології mmWave з мережами Wi-Fi також може забезпечити високошвидкісний доступ до Інтернету в приміщеннях, таких як

офіси та будинки. Цифровий розрив означає розрив між тими, хто має доступ до високошвидкісного Інтернету, і тими, хто ні [15, 17].

Розгортання технології mmWave має потенціал для подолання цього розриву, забезпечуючи високошвидкісний Інтернет у недостатньо охоплених районах. Однак розгортання технології mmWave у сільській місцевості створює кілька проблем, таких як вартість розгортання та обмежена доступність спектру. Щоб сприяти розгортанню технології mmWave у недостатньо охоплених районах, політики можуть надавати стимули та субсидії телекомунікаційним компаніям. Вони також можуть сприяти розробці нових бізнес-моделей, які можуть сприяти розгортанню технології mmWave у сільській місцевості комерційно життєздатних районів.

Розгортання технології mmWave у районах із недостатнім обслуговуванням може мати значні соціальні та економічні вигоди, такі як покращення доступу до охорони здоров'я, освіти та можливостей працевлаштування. Розгортання технології mmWave може мати вплив на навколишнє середовище, наприклад споживання енергії інфраструктури та потенціалу перешкод для інших бездротових технологій. Однак вплив технології mmWave на навколишнє середовище менший, ніж традиційних бездротових технологій, таких як 4G і 3G. Щоб зменшити вплив технології mmWave на навколишнє середовище, можна впровадити такі заходи, як використання відновлюваних джерел енергії та оптимізація мережевої інфраструктури. Використання невеликих комірок і формування променя також може зменшити потребу у великій інфраструктурі та звести до мінімуму вплив на навколишнє середовище.

На завершення, технологія mmWave має потенціал для революції в бездротовому зв'язку, надаючи високошвидкісний Інтернет з низька затримка. Розгортання технології mmWave у мережах 5G дає кілька переваг, таких як покращення затримки мережі, пропускної здатності та надійності. Неможливо переоцінити важливість конструкції антени, розподілу спектру та моделювання каналів для успішного розгортання технології mmWave.

Розгортання технології mmWave також представляє кілька проблем, таких як вартість розгортання, обмежена доступність спектру та потенційний вплив на навколишнє середовище. Проте потенційні переваги технології mmWave у подоланні цифрового розриву та покращенні доступу до охорони здоров'я, освіти та можливостей працевлаштування не можна ігнорувати.

У майбутньому подальші дослідження та розробки технології mmWave можуть призвести до нових інновацій та тенденцій, такі як інтеграція технологій mmWave і sub-6GHz. Потенційний вплив технології mmWave на майбутній бездротовий зв'язок є значним, і очікується, що вона зіграє вирішальну роль у розвитку мереж 6G.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДОСТАВЛЯННЯ ІНФОРМАЦІЇ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ

3.1 Системний підхід до надійнісного проектування ТКС

До теперішнього часу при проектуванні складних систем встановилися два основні підходи: класичний і системний.

Класичний підхід припускає розробку системи на основі синтезу окремих її підсистем і подальше об'єднання цих підсистем як компонентів в єдину систему. Класичний підхід ґрунтується на русі від частки до загального і часто не розкриває тих загальних завдань, які необхідно вирішувати в цій системі, враховуючи, що вона входить як підсистема в систему вищого рангу.

Системний підхід обумовлений, передусім, цілями і завданнями, які повинні вирішувати ця система, як основна частина складнішої системи. Відповідно до цього системний підхід можливий тільки при визначенні цілей поведінки системи, критеріїв ефективності, стратегії управління, побудови моделі системи і, нарешті, розробки системи в цілому з урахуванням різних підсистем, що входять до її складу.

Основною метою ТКС є передача заданих об'ємів інформації різних рівнів пріоритетності по каналах зв'язку з необхідною достовірністю і швидкодією (в т.ч. і дій, що управляють). Така постановка завдання допускає безліч різних шляхів рішення, що дають в результаті різні варіанти архітектура ТКС, що задовольняє заданим вимогам за швидкістю передачі, надійності, вартості, числу обслуговуваних каналів зв'язку і іншим характеристикам [18,21].

Першим кроком у проектуванні телекомунікаційної системи є збір і аналіз вимог. Це передбачає визначення мети та обсягу системи, визначення вимог користувача та технічних специфікацій, а також оцінку існуючої інфраструктури та сумісності з новою системою. Щоб визначити мету та сферу застосування системи, важливо зрозуміти комунікаційні потреби організації та цілі системи. Це включає визначення типів необхідних каналів зв'язку, таких як голос, відео та дані,

а також очікуваних моделей використання та обсягів трафіку. Визначення вимог користувача та технічних специфікацій передбачає охоплення потреб кінцевих користувачів системи, таких як необхідні функції, функціональні можливості та продуктивність. Потім ця інформація використовується для розробки технічних специфікацій, включаючи вимоги до обладнання та програмного забезпечення, пропускну здатність мережі та вимоги безпеки. Оцінка існуючої інфраструктури має вирішальне значення для забезпечення сумісності з новою системою та виявлення будь-яких потенційних проблем або обмежень. Це включає в себе оцінку топології мережі, апаратних і програмних компонентів, а також визначення будь-яких вимог інтеграції з іншими системами.

Після завершення збору та аналізу вимог наступним кроком є проектування та впровадження телекомунікаційної системи. Це передбачає вибір відповідних апаратних і програмних компонентів, створення детальної архітектури системи та топології мережі, а також розробку плану тестування та розгортання. Вибір відповідних апаратних і програмних компонентів має вирішальне значення для забезпечення відповідності системи технічним характеристикам і вимогам користувача. Це включає оцінку доступних опцій і вибір найбільш відповідних компонентів на основі таких факторів, як вартість, продуктивність і сумісність.

Створення детальної архітектури системи та топології мережі має важливе значення для забезпечення того, щоб система відповідала потребам організації та могла бути ефективно реалізована. Це передбачає розробку комплексного плану для фізичних і логічних компонентів системи, включаючи сервери, комутатори, маршрутизатори та інші мережеві пристрої. Розробка плану тестування та розгортання має вирішальне значення для забезпечення ефективного впровадження системи та її відповідності потребам організації. Це включає розробку тестових випадків для перевірки функціональності та продуктивності системи та розробку плану розгортання для забезпечення плавного переходу до нової системи.

Після впровадження системи важливо підтримувати й оптимізувати її продуктивність, щоб забезпечити оптимальну функціональність і надійність. Це

передбачає моніторинг і усунення проблем із системою, виконання регулярних завдань технічного обслуговування, таких як оновлення та резервне копіювання, а також оптимізацію продуктивності системи за допомогою планування потужностей і розподілу ресурсів. Моніторинг і усунення системних проблем включає виявлення та вирішення будь-яких проблем, які виникають, наприклад, перевантаження мережі, збої апаратного забезпечення або помилки програмного забезпечення. Це вимагає проактивного підходу до моніторингу продуктивності системи та забезпечення швидкого й ефективного вирішення проблем. Виконання регулярних завдань з обслуговування, таких як оновлення та резервне копіювання, є критично важливим для забезпечення актуальності та безпеки системи. Це включає оновлення програмного забезпечення та мікропрограми, регулярне резервне копіювання та забезпечення захисту системи від загроз безпеки.

Вибір оптимальних проектних рішень ускладнюється ще і тим, що відсутній можливість кількісного виміру властивостей системи; а уявлення про «найкраще рішення» неоднозначно і суперечливо у зв'язку зі зміною вимог і ролі проектованого об'єкту на різних етапах його життєвого циклу.

Питання побудови надійних ТКС розглядалися багатьма авторами. Проте, як показує аналіз публікацій, пропоновані методи забезпечення високої надійності функціонування систем спираються на серйозну додаткову алгоритмічну підтримку, яка припускає спочатку визначення місця дефекту, а потім відповідне програмно-апаратне рішення. Проте, у відповідальних системах, працюючих в реальному масштабі часу, необхідно зберігати 100% працездатності за наявності одного і більше за відмови і в цих системах немає часу на усунення несправності в загальноприйнятому сенсі, тобто система спочатку має бути орієнтована на адаптацію до умов функціонування, що змінюються.

Необхідність швидкої адаптації і корекції структури ТКС в умовах різкої зміни умов функціонування і збільшені вимоги до ефективності і надійності зв'язків між елементами, що створюються на основі модульних технологій, при яких визначальні форми стійкості (надійності) носять в основному структурний характер і диктуються вибором топології мережі, призводять до необхідності

отримання ефективнішого, однозначнішого взаємозв'язку і узгодженості складових частин: ефективності функціонування, надійності і захищеності, що виразилася в понятті структурно-функціональної цілісності ТКС. Рішення усіх цих завдань вимагає перегляду традиційних підходів до надійнісному синтезу ТКС, а так само пошуку шляхів подальшого розвитку властивих їм переваг у рамках єдиного методологічного підходу.

Розглянемо основні критерії оцінки структурно-функціональної цілісності ТКС.

Ефективність функціонування ТКС. Це її здатність досягати поставлену мету в заданих умовах застосування і з певною якістю. Конкретизуючи це поняття, можна сказати, що ефективність ТКС - це характеристика, що відбиває міру відповідності системи своєму призначенню, технічну досконалість і економічну доцільність. Поняття ефективності пов'язане з отриманням деякого корисного результату - ефекту використання ТКС. Ефект досягається ціною витрат певних ресурсів, тому ефективність мережі часто розглядається у вигляді співвідношення між ефектом (виграшем) і витратами.

Ефективність ТКС оцінюється на різних стадіях життєвого циклу мережі - від етапу її проектування, коли виконується апріорна оцінка з метою визначення очікуваної ефективності і вирішення питання про доцільність реалізації проекту, до етапу експлуатації, коли проводиться апостеріорна оцінка з метою визначення фактичної ефективності, що підтверджує або якоюсь мірою спростовує прогнози.

Апостеріорна оцінка зазвичай проводиться методами прямого рахунку з використанням аналітичних співвідношень, що характеризують вплив різних чинників і параметрів на показники ефективності.

Апріорна оцінка - набагато складніше і трудомістке завдання, яке здійснюється на початкових етапах проектування.

Показник ефективності (ПЕ) системи - кількісна характеристика, що розглядається стосовно певних умов її функціонування. Показник ефективності ТКС визначається процесом її функціонування, він є функціоналом від цього процесу, який в загальному вигляді записується як $W = W\left(t, L_{\hat{E}}, L_{T\ddot{I}}, L_{A}, L_{\ddot{A}}, L_{\dot{O}}\right)$, де

W - безліч ПЕ системи; t - час; $L_К$, $L_{ТП}$, $L_А$, $L_Д$, $L_У$ - безліч параметрів потоків запитів, що входять, на обслуговування користувачів ($L_К$), технічних і програмних засобів мережі ($L_{ТП}$), алгоритмів обробки і передачі інформації в системі ($L_А$), діяльності користувачів ($L_Д$), умов функціонування мережі ($L_У$) відповідно.

Відповідно до конкретизації поняття ефективності, показники безлічі W можна розділити на три групи $W = \{W_Ц, W_Т, W_Е\}$, де $W_Ц$ - показники цільової ефективності ТКС або ефективності використання (цільового застосування), це кількісна міра відповідності системи своєму призначенню; $W_Т$ - показники технічної ефективності ТКС, це кількісна міра, що відбиває технічну досконалість системи; $W_Е$ - показники економічної ефективності ТКС, це кількісна міра економічної доцільності мережі [20].

Вибір показників цільової ефективності мережі визначається її призначенням, у зв'язку з чим, має місце велике різноманіття показників групи.

Для кількісної оцінки цього ефекту можуть застосовуватися найрізноманітніші одиниці виміру.

Цільова ефективність оцінюється наступними показниками:

- точнісними ($W_{ТН}$), надійнісними ($W_Н$) і часовими ($W_Ч$), застосовані в системах спеціального призначення для оцінки ефективності використання в них мережевих структур;

- часовими показниками цільового використання мережевих структур в управлінні народним господарством на різних його рівнях, що характеризують підвищення оперативності управління;

- що характеризують підвищення якості продукції, технологія виробництва якої включає використання ТКС;

- що характеризують економіку виробництва продукції із застосуванням мережевих структур, якщо мета використання ТКС полягає саме в поліпшенні характеристик виробничо-господарської діяльності організації (в цьому випадку показники цільової ефективності одночасно є і показниками економічної ефективності).

За допомогою показників технічної ефективності оцінюється ефективність ТКС як складної апаратно-програмної кібернетичної системи при роботі її в різних режимах. При цьому не береться до уваги ефект, що отримується за рахунок реалізації результатів рішення завдань (задоволення запитів) користувачів системи.

Для оцінки технічної ефективності системи доцільно використовувати наступні показники:

- пропускну спроможність інформаційної мережі $V_{ПД}$, тобто середній потік даних, що фактично передаються через мережу. Слід відрізняти фактичну пропускну спроможність каналу або лінії зв'язку від фізичної пропускної спроможності $V_К$, яка визначається можливостями і властивостями передавального середовища і є одним з головних її параметрів. Очевидно, що величина $V_{ПД}$ істотно залежить від фізичної пропускної спроможності каналу або лінії зв'язку. Але вона визначається і багатьма іншими чинниками: використовуваними методами доступу в передавальне середовище, завантаженням каналу, способами управління мережею, якістю і можливостями мережевої операційної системи і т. д. Усі ці чинники обумовлюють потоки передаваних даних і фактичну швидкість їх передачі, тобто фактичну (а не фізичну) пропускну спроможність каналу:

- швидкість передачі кадрів (коротких повідомлень) $V_Ф$, тобто число кадрів, що передаються за одиницю часу по мережі. Це дуже важливий показник, використовуваний у разі, коли потік даних (трафік) містить в основному тільки короткі кадри;

- затримку в мережі $T_{ЗМ}$, що вноситься в передачу даних користувача, тобто час доставки повідомлення від відправника до одержувача. Це дуже важливий параметр для ТКС, що визначає час реакції системи на якусь подію;

- залежність часу затримки повідомлення в мережі від її середньої пропускної спроможності $T_{ЗС} = f(V_{ПД})$. Опис ефективності мережі за допомогою такої залежності має велике значення, оскільки при збільшенні завантаження мережі (збільшенні фактичного потоку даних) абонент повинен чекати більше часу для початку передачі своїх даних.

Надійність ТКС. Надійність - здатність ТКС в процесі експлуатації зберігати працездатність впродовж встановленого інтервалу часу. Надійність визначає готовність технічних засобів. Вона характеризується тривалістю надання необхідних послуг в нормальних умовах експлуатації ТКС і визначається часом напрацювання на відмову. Надійність - складний показник ТКС, що включає властивості відмовостійкості (забезпечення постійної працездатності за наявності несправностей), довговічності, ремонтопридатності [23].

Надійність функціонування ТКС знижується через несправності ТКС, які можуть бути пов'язані з некорректностями при проектуванні системи або при формуванні вимог до системи; з тим, що нормально функціонуюча система може виявитися несправною унаслідок зовнішніх дії; з порушеннями технології в процесі виробництва апаратних засобів.

До недавнього часу надійними вважалися тільки складні закриті і дорогі системи, що припускають часте дублювання вузлів. З появою відкритих комп'ютерних мереж з'явилася можливість будувати надійні системи з універсальних компонентів, які можна замінити у разі аварії без порушення працездатності.

Вихід системи з ладу насправді визначити непросто. Річ у тому, що не завжди проста робота серверів або обробка запитів є достатньою ознакою функціонування системи. Якщо дані, що при цьому зберігаються в ній, не відповідають реальності, то систему можна вважати непрацездатною. В той же час аварія одного сервера може не порушити працездатності усієї системи в цілому. Розглянемо детальніше, які саме умови повинні дотримуватися при нормальному функціонуванні системи.

Цілісність даних. Дані, що знаходяться в коректно функціонуючій системі, мають бути несуперечливими і відповідати реальності. Система стає нефункціональною, якщо хтось вніс в неї несанкціоновані зміни. На жаль, проконтролювати точність даних досить складно, проте, в критично важливих інформаційних системах треба передбачити контроль цілісності, наприклад, по контрольній сумі або за допомогою електронно-цифрового підпису.

Керованість. Для зміни конфігурації і виправлення помилок в системі мають бути передбачені механізми управління і контролю її стану. Якщо система вийде з-під контролю адміністратора, то так само не можна говорити про її штатну роботу, оскільки вона може неадекватно реагувати на запити користувачів. Тому усе важливі ТКС повинні мати механізми контролю стану і інструменти для зміни їх конфігурації без зупинки усієї системи.

Безпека. Щоб виключити несанкціоновану зміну системи і цілісність даних, треба передбачити механізми ідентифікації і авторизації користувачів, а також забезпечити конфіденційність певних даних. В деяких випадках компрометація конфіденційної інформації еквівалентна виходу системи з ладу. Це, наприклад, відноситься до даних системи контролю цілісності. Тому треба передбачити механізми ідентифікації користувачів, авторизації їх доступу до ресурсів системи і криптографічного захисту конфіденційних даних.

Зв'язність. Сучасні складні ТКС складаються, як правило, з декількох компонентів, сполучених комунікаційними каналами. Природно, при порушенні зв'язку між компонентами система не зможе виконувати свої функції, тому логічно передбачити підсистеми мережевого управління і моніторингу. Зараз більшість інформаційних систем будуються на базі протоколу TCP/IP, який був розроблений для ненадійних мереж і має усі необхідні механізми для встановлення надійних сеансів зв'язку. Тому у більшості випадків для контролю зв'язності досить використовувати стандартні способи, передбачені в протоколі TCP/IP.

У критично важливій системі треба мати механізми для перевірки працездатності, оскільки важливо знати - коректно або ні працює система. За дотриманням цілісності даних, як правило, стежать ті компоненти, які ці дані і обробляють. В той же час контроль зв'язності і безпеки краще всього робити централізовано, оскільки для працездатності системи важливий загальний стан цих підсистем. Для вирішення конкретних завдань, можливо, знадобиться накладення додаткових умов, наприклад, для систем електронної комерції, таким додатковим критерієм може служити доступність Web-інтерфейса.

Відмовостійкість. Кількість одночасних відмов компонентів системи, які призводять до припинення роботи, - чим більше вузлів системи треба вивести з ладу для припинення її роботи, тим більше відмовостійка така система.

Відмовою системи називається поведінка системи, що не задовольняє її специфікаціям. Відмова системи може бути викликана відмовою (невірним спрацьовуванням) якихось її компонентів [19].

Відмова компонента може бути викликана помилками при конструюванні, при виробництві або програмуванні. Він може бути також викликаний фізичним ушкодженням, зношуванням устаткування, некоректними вхідними даними, помилками оператора, і багатьма іншими причинами.

Відмови можуть бути випадковими, періодичними або постійними. Випадкові відмови (збої) при повторенні операції зникають. Причиною такого збою може служити, наприклад, електромагнітна перешкода від трамвая, що проїжджає мимо. Інший приклад - рідкісна ситуація в послідовності звернень до операційної системи від різних завдань.

Періодичні відмови повторюються часто впродовж якогось часу, а потім можуть довго не відбуватися. Приклади - поганий контакт, некоректна робота операційної системи після обробки аварійного завершення завдання.

Постійні (стійкі) відмови не припиняються до усунення їх причини - руйнування диска, виходу з ладу мікросхеми або помилки в програмі.

Відмови за характером свого прояву підрозділяються на візантійські (система активна і може проявляти себе по-різному, навіть зловмисно) і «пропажа ознак життя» (часткова або повна). Перші розпізнати набагато складніше, ніж другі. Свою назву вони дістали по імені Візантійської імперії (330-1453 рр.), де процвітали конспірація і обман.

У табл. 3.1 приведені чинники, що викликають відмову системи на прикладі високоавтоматизованої широкомасштабної розподіленої системи зв'язку США PSTN (Public Switched Telephone Network).

Відмовостійкість підвищує загальну надійність системи, зібраної з недостатньо надійних компонентів. Вимоги по відмовостійкості визначаються по

різниці між необхідним рівнем надійності і реальною надійністю існуючих компонентів.

Таблиця 3.1

Розподіл відмов в мережі

Група чинників	Доля від загальної кількості відмов, %	Втрати споживчого часу, %
Відмови технічних засобів	19	7
Перевантаження мережі	6	44
Помилки програмного забезпечення	14	2
Помилки персоналу	25	14
Вандалізм	1	1
Неумисна руйнівна діяльність людей	24	14
Природні явища	11	18

Доступність. Час, за який новий користувач дістає доступ до системи або сервісу - чим менше цей час, тим вище доступність. Доступність визначається декількома чинниками, найбільш важливими з яких являються: надійність системи, її продуктивність і кількість користувачів. Необхідний час доступу можна вичислити як по зарплаті співробітників, що користуються системою, так і по збитку, викликаному затримкою доступу.

Масштабованість. Відношення поточної продуктивності системи до максимально досяжної без архітектурних змін - чим більше можна нарощувати продуктивність, тим вище масштабованість. Ця характеристика впливає на доступність системи - коли комп'ютери вже не устигають обробляти запити, треба збільшити продуктивність системи, а це залежить від масштабованості. Вимоги по масштабованості визначають виходячи з витрат на архітектурну перебудову системи і вартості простою у разі, коли продуктивності бракує для обслуговування потрібного числа користувачів.

Час відновлення. Навіть найнадійніші системи іноді виходять з ладу, наприклад, через пожежу або стихійне лихо. Час відновлення після аварії так само є важливою характеристикою для життєво важливих систем. Причому відновлення системи - це не лише забезпечення доступу до серверів і додатків, але і відновлення цілісності важливих даних. Необхідний час відновлення визначається по збитку від простою системи.

Під стійкістю системи обробки інформації і управління розуміється властивість здійснювати необхідні перетворення інформації, зберігаючи вихідні реакції в межах допусків, встановлених специфікацією, при дії таких чинників нестабільності, як помилки початкових цих програм, некоректні дії персоналу і користувачів, невиявлені помилки програмного забезпечення (ПО) і програмні віруси, відмови і збої устаткування.

Традиційно вважається, що для звичайної системи досить надійності, рівної 99,5 % (зазвичай - серверні системи з наявністю надмірних компонентів), при цьому її простої за рік можуть скласти близько 43 годин. Для рівня ж високої готовності інформаційно-телекомунікаційної системи потрібний показник 99,9 % (кластерні системи, але без функцій стійкості до катастроф), що відповідає 8 годинам простою в рік. І, нарешті, для відмовостійких систем показник працездатності дорівнює 99,9999 % (не більше 32 секунди простоїв за рік). При реалізованому рішенні «Disaster Tolerance», комп'ютерна система практично не чутлива до катастроф.

Під високою відмовостійкістю розуміється сукупність конфігурації програмних і апаратних засобів і організаційних заходів, які забезпечують збереження життєво важливих даних, а також можливість продовження роботи обчислювального комплексу у разі різних катаклізмів, що спричиняють за собою вихід з ладу або знищення якоїсь частини комплексу. Звичайно це два обчислювальні центри, сполучених між собою надмірними каналами зв'язку і рознесених на деяку відстань, достатню для того, щоб можлива катастрофа не нанесла ущерб одночасно обом центрам. При цьому конфігурація, а також склад

устаткування і програмного забезпечення кожного центру можуть відрізнятися один від одного.

З поняттям високої відмовостійкісті тісно пов'язаний термін «відновлення після катастрофи» (Disaster Recovery). Відмінність першого від другого полягає в тому, що відновлення акцентує увагу на збереженні даних і часто включає план заходів і процедур, які необхідно виконати після катастрофи для відновлення працездатності ТКС в заданий час при чітко передбачуваних втратах.

Повністю надійна система має три стани [24]:

– робоче, в якому система виконує своє функціональне призначення і забезпечує активну надмірність усіх елементів;

– незахищене, в якому система виконує своє функціональне призначення, але не забезпечує активної надмірності хоч би одного з елементів;

– неробоче, в якому система не виконує свого функціонального призначення.

Повністю надійна система повинна забезпечувати:

– виявлення помилок до початку їх впливу на цілісність даних;

– ізоляцію елементів, що вносять помилки;

– автоматичний перехід в незахищений стан при збереженні безперервності виконання функціонального призначення;

– повідомлення про перехід в незахищений стан;

– можливість заміни елементів, що відмовили, при збереженні безперервності виконання функціонального призначення;

– відновлення захищеного стану при збереженні безперервності виконання функціонального призначення.

Захищеність. Захищені системи - це системи, на які покладаються функції підтримки конфіденційності, цілісності довіреної інформації, а також її доступності при авторизованому доступі. Фундаментальним елементом системи, що забезпечує безпеку, є механізм захисту, вбудований в систему (тут не розглядаються спеціальні заходи по забезпеченню захисту даних такі, як організаційні дії, застосування криптоалгоритмів і т. д.). Вимоги, що визначають захищеність інформаційної системи, формалізуються у вигляді моделі безпеки.

Запропонована безліч моделей безпеки (security models), призначених для виконання функцій захисту інформації. Термін «модель безпеки» застосовується для формального опису вимог конфіденційності, цілісності і доступності. Якщо обмежитися в розгляді тільки моделями конфіденційності, то теорія моделей безпеки може бути зведена до визначення спеціального механізму забезпечення конфіденційності, так званого контролю доступу (access control), привнесеного до комп'ютерного світу з сфери документообігу, що категоризується. Відповідні моделі дістали назву «Моделі контролю доступу» (access control models). Ці моделі визначають обмеження на поведінку системи, достатні для того, щоб при їх виконанні гарантувати конфіденційність інформації, що зберігається.

У будь-якій моделі контролю доступу можна виділити три компоненти: стани безпеки системи, правила контролю доступу і критерії безпеки (рис. 3.1) [25].

Компонент, що відповідає станам моделі, - це абстракція стану системи в контексті моделі контролю доступу (наприклад, облікові записи користувачів, активні користувачі, програми, що виконуються, файли, права доступу і т. д.). Компонент, що містить правила контролю доступу, визначає обмеження, що накладаються моделлю на поведінку системи. Останній компонент, критерії безпеки, дозволяє виділити захищені стани з усієї безлічі станів.

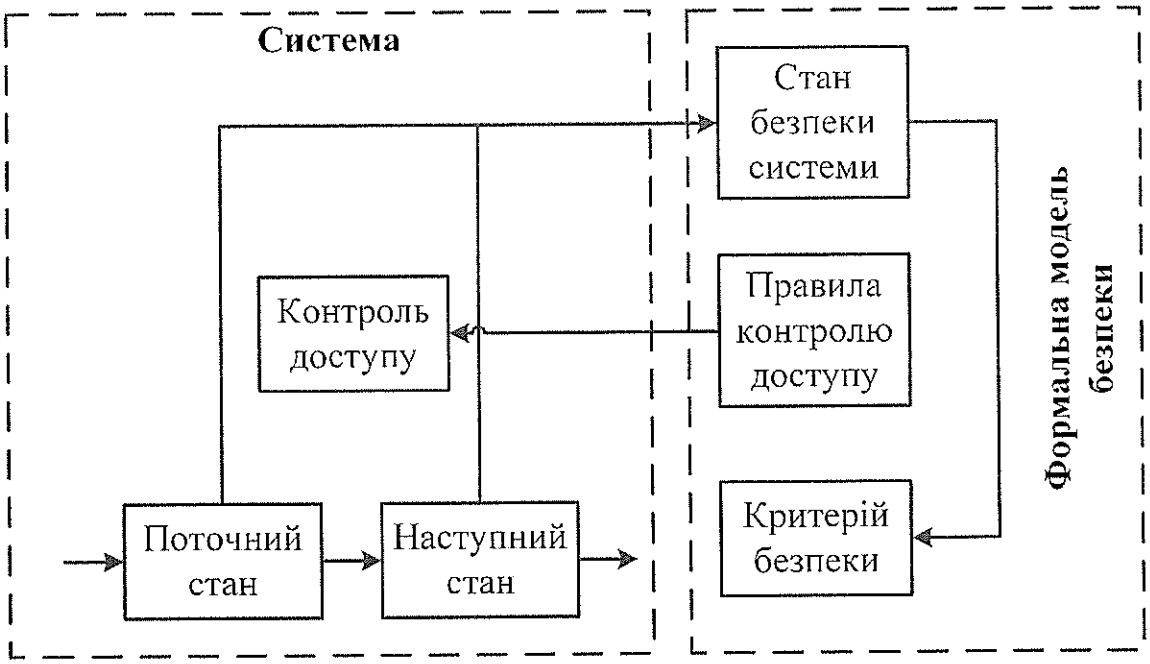


Рис. 3.1. Взаємозв'язок компонентів системи і моделі контролю доступу

Доказ того, що поведінка системи не приводить до несанкціонованого доступу, є підтвердженням того, що впроваджена в систему модель контролю доступу реалізує захист. Отже, важливою властивістю моделі безпеки можна назвати можливість верифікації її безпеки.

3.2 Методи підвищення надійності

Є два способи підвищення доступності ресурсів: збільшення індивідуальної надійності серверів і поліпшення загальносистемної відмовостійкості. У першому випадку збільшується надійність кожного елементу системи, що дозволяє будувати конфігурації високої доступності з невеликого, кількості компонентів.

Розглянемо методи забезпечення відмовостійкості в мережах мобільного зв'язку, включаючи методи резервування, механізми виявлення та виправлення помилок, а також стратегії стійкості мережі.

Методи резервування включають дублювання критичних компонентів для забезпечення безперервності обслуговування. Наприклад, мережі мобільного зв'язку можуть використовувати резервні джерела живлення, такі як батареї або генератори, щоб гарантувати, що мережа продовжує працювати під час відключень електроенергії. Крім того, можна реалізувати резервні мережеві шляхи, щоб уникнути окремих точок збою. Це означає, що якщо один мережевий шлях виходить з ладу, трафік можна перенаправити на альтернативний шлях, гарантуючи, що мережа продовжує працювати.

Методи резервування включають дублювання критичних апаратних компонентів, щоб гарантувати, що система може продовжувати працювати, навіть якщо один або більше компонентів виходять з ладу. Є кілька методів резервування, які можна використовувати для підвищення надійності апаратного забезпечення телекомунікаційних систем: N+1 Резервування: Ця техніка передбачає наявність одного додаткового компонента, доступного для керування у разі збою. Наприклад,

якщо системі потрібні чотири джерела живлення, резервування N+1 передбачатиме наявність п'яти джерел живлення. 2N Redundancy: Ця техніка передбачає дублювання всіх критичних компонентів, у результаті чого створюється повна резервна система. Наприклад, якщо система має чотири джерела живлення, резервування 2N передбачатиме наявність восьми джерел живлення. Резервування в режимі холодного резервування: Ця техніка передбачає наявність повної системи резервного копіювання, яка не працює активно. У разі збою спрацьовує резервна система. Ця техніка часто використовується в системах, де час простою не є критичним.

Відмовостійке проектування апаратного забезпечення передбачає проектування систем, які можуть продовжувати працювати, навіть якщо один або більше компонентів виходять з ладу. Існує декілька технік проектування відмовостійкого апаратного забезпечення, які можна використовувати для підвищення надійності апаратного забезпечення телекомунікаційних систем: Потрійне модульне резервування (TMR): ця техніка передбачає потрійне повторення критичних компонентів і використання логіки голосування, щоб гарантувати, що система продовжує працювати, навіть якщо один компонент виходить з ладу. Пам'ять коду з виправленням помилок (ECC): Ця техніка передбачає додавання додаткових бітів до пам'яті для виявлення та виправлення помилок. Схеми самоперевірки: Ця техніка передбачає розробку схем, які можуть виявляти помилки та вживати заходів щодо їх виправлення. Наприклад, схема може бути розроблена для автоматичного перемикання на резервний компонент у разі виявлення збою.

Стратегії профілактичного обслуговування передбачають вжиття профілактичних заходів для запобігання збоїв обладнання. Існує кілька стратегій профілактичного обслуговування, які можна використовувати для підвищення надійності апаратного забезпечення телекомунікаційних систем: Регулярна перевірка та тестування обладнання: це передбачає регулярну перевірку обладнання та його тестування для виявлення можливих збоїв до їх виникнення. Заміна застарілих компонентів: це передбачає заміну компонентів, термін служби

яких наближається до кінця, щоб запобігти поломкам. Впровадження контролю навколишнього середовища для запобігання пошкодженням від перегріву та вологості: це передбачає впровадження заходів щодо контролю температури та вологості середовища, в якому знаходиться обладнання, щоб запобігти пошкодженню.

Для виявлення та виправлення помилок у передачі даних використовуються механізми виявлення та виправлення помилок. Однією з поширених методик є реалізація кодів виправлення помилок, які можуть виявляти та виправляти помилки в потоці даних. Алгоритми виявлення несправностей також можуть бути реалізовані для моніторингу продуктивності мережі та виявлення потенційних проблем. Потім можна використовувати механізми зворотного зв'язку для налаштування параметрів передачі та оптимізації продуктивності мережі. Ці механізми забезпечують швидке виявлення та виправлення помилок, запобігаючи збоям у роботі.

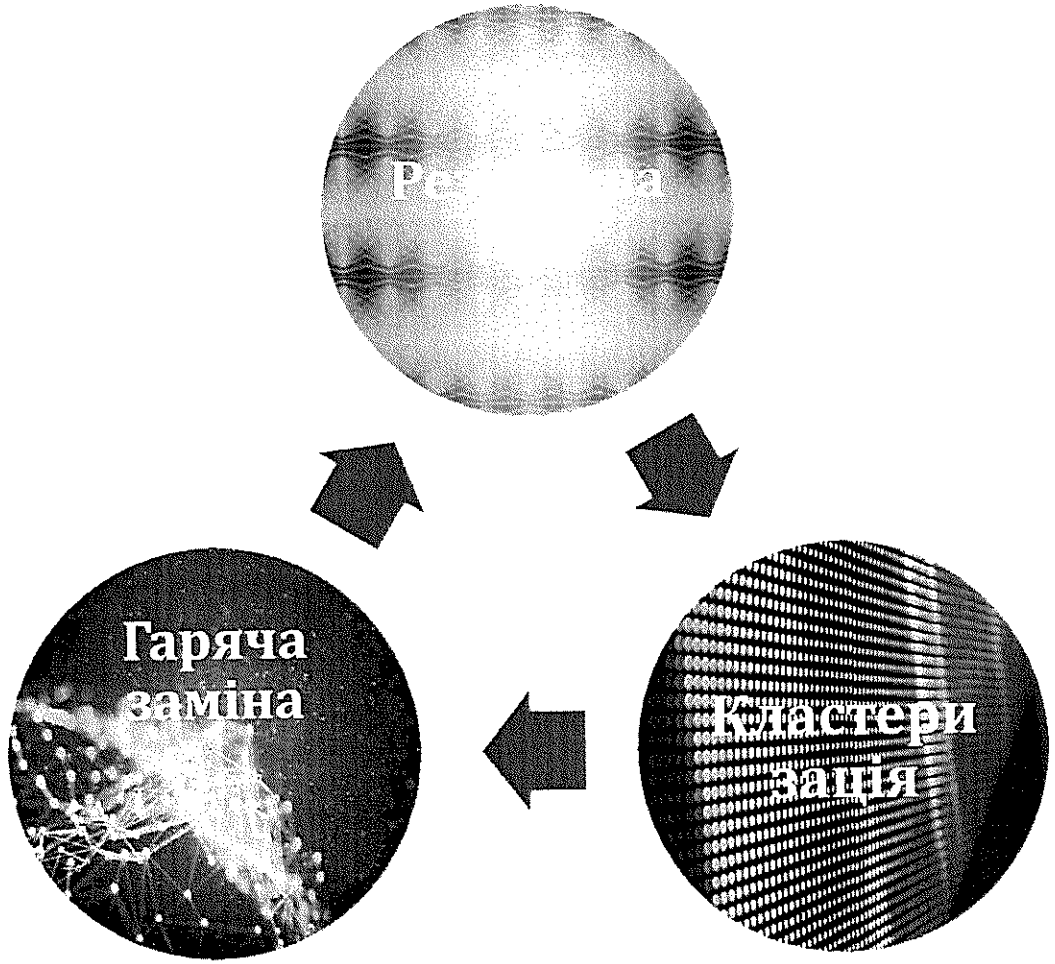
Стратегії стійкості мережі передбачають реалізацію планів аварійного відновлення для забезпечення безперервності обслуговування під час стихійних лих або інших надзвичайних ситуацій. Ці плани можуть передбачати використання резервних джерел живлення, а також впровадження методів балансування навантаження для розподілу трафіку між кількома вузлами мережі та запобігання перевантаженню. Крім того, можна застосувати заходи безпеки для захисту від кібератак та інших загроз безпеці. Ці стратегії гарантують, що мережа залишається працездатною навіть у несприятливих умовах.

Забезпечення відмовостійкості в мережах мобільного зв'язку має вирішальне значення для забезпечення безперервності обслуговування. Методи резервування, механізми виявлення та виправлення помилок, а також стратегії стійкості мережі є важливими для досягнення цієї мети. Впроваджуючи ці методи, мережі мобільного зв'язку можуть залишатися працездатними навіть у несприятливих умовах, забезпечуючи нам постійний доступ до інформації та зв'язку.

РОЗПОДІЛ ВІДМОВ В МЕРЕЖІ

Група чинників	Доля від загальної кількості відмов, %	Втрати споживчого часу, %
Відмови технічних засобів	19	7
Перевантаження мережі	6	44
Помилки програмного забезпечення	14	2
Помилки персоналу	25	14
Вандалізм	1	1
Неумисна руйнівна діяльність людей	24	14
Природні явища	11	18

МЕТОДИ ЗБІЛЬШЕННЯ АПАРАТНОЇ НАДІЙНОСТІ



ВИСНОВКИ

У 1 розділі виконано огляд мобільних технологій попередніх поколінь та вплив технології 5G на суспільство: революція в пропускній здатності, мінімальної затримки та Інтернету речей.

Основні характеристики та відмінності 5G: швидкість передачі даних; затримка; щільність підключень; надійність зв'язку.

У 2 розділі досліджено методи модуляції та мультиплексування в сучасних мобільних мережах, що забезпечують надійності доставляння інформації.

У 3 розділі досліджено важливість забезпечення надійності доставляння інформації у телекомунікаційній системі, визначено чинники, що викликають відмову системи та дозволяють запобігти таким відмовам.

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Основні результати магістерської роботи доповідалися на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Telecommunication: problems and innovation», Київ: ДУІКТ, 20 грудня 2023 р.

Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано в науковому журналі "Наукові записки ДУІКТ, – 2023, – №2".

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

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

Автор: Олександр ЯКУБ

Назва: Методи забезпечення відмовостійкості в мережах мобільного зв'язку

Координатор: Андрій ЛЕМЕШКО

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1 :11.0

Коефіцієнт подібності 2 :6.6

Тривога: 10

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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

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

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

…… ……

Дата *Підпис Наукового керівника*