

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Дослідження мобільних мереж 6G
із вбудованим штучним інтелектом»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТКС-21мз
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

Якубівська Н.В.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ІКСТ

Васильківський М.В.

« 09 » червня 2023 р.

Опонент: к.т.н., ст. виклач каф. ІРТС

Притула М.О.

« 09 » червня 2023 р.

Допущено до захисту

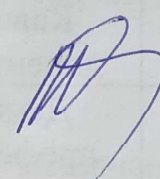
Завідувач кафедри ІКСТ

Кичак В.М.
д.т.н., проф.

« 09 » червня 2023 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань - 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність - 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІКСТ
д.т.н., професор В.М. Кичак
 "03" червня 2023 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Якубівській Наталі Володимирівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом

керівник роботи Васильківський Микола Володимирович, канд. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "20" 03 2023 року № 68

2. Строк подання студентом роботи 14 червня 2023 року

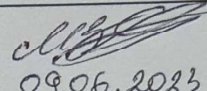
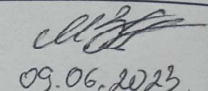
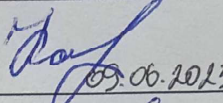
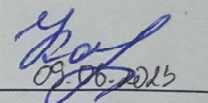
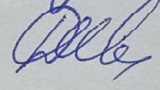
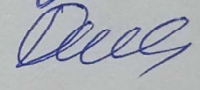
3. Вихідні дані до роботи діапазон носійних частот – 100-300 ГГц, діапазон значення ширини смуги пропускання – 1-10 ГГц, діапазон пікових значень швидкості передавання даних (DL) – 20-200 Гбіт/с, діапазон пікових значень швидкості передавання даних (UL) – 10-100 Гбіт/с, діапазон значень швидкості передавання даних (DL) для одного користувача – 0,1-1 Гбіт/с, діапазон значень швидкості передавання даних (UL) для одного користувача – 50-500 Мбіт/с, діапазон значення затримки при передаванні сигналів для одного користувача – 1-0,5 мс, діапазон значень затримки для групових сигналів керування – 20-5 мс, діапазон значень щільності підключення користувачів в мережі – 1-10 пристрій/м², діапазон значень мобільності користувачів мережі – 500 – 1000 км/год, діапазон значень пропускнуої здатності мережі – 0,1 – 1 Тбіт/с, діапазон значень ємності мережі – 0,002 – 1 трильйон пристроїв.

4. Зміст текстової частини: технології побудови інфокомунікаційних мереж 6G, безпроводні мережі 6G із підтримкою штучного інтелекту, дослідження фізичного рівня безпроводної мережі зі штучним інтелектом, дослідження каналного рівня передачі даних зі штучним інтелектом, мережевий рівень з підтримкою штучного інтелекту.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) архітектури сегментів мобільних мереж RAN, 5G vRAN та Open RAN; структура сегменту інтегрованої мережі 6G; схема передавача та приймача з використанням програмованої метаповерхні; структурні схеми блоків фізичного рівня на основі

OFDM, блоків фізичного рівня з алгоритмом МН в приймачі та обробки на основі МН на фізичному рівні; структура наскрізного фізичного рівня на основі МН підкріпленням; алгоритм класифікації інформаційного трафіку на основі машинного навчання.

6. Консультанти розділів роботи

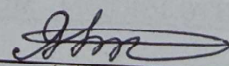
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Васильківський М.В., доцент кафедри ІКСТ	 09.06.2023	 09.06.2023
Економічна частина	Кавецький В.В. доцент каф. ЕПВМ	 09.06.2023	 09.06.2023
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Дембіцька С.В. професор кафедри БЖДПБ	 09.06.2023	 09.06.2023

7. Дата видачі завдання 30 січня 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

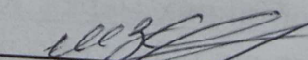
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Приміт
1.	Дослідження технологій побудови інфокомунікаційних мереж 6G, безпроводні мережі 6G із підтримкою штучного інтелекту	10.02.2023р.	
2.	Дослідження безпроводних мереж 6G із підтримкою штучного інтелекту	20.02.2023р.	
3.	Дослідження фізичного рівня безпроводної мережі зі штучним інтелектом	10.03.2023р.	
4.	Дослідження каналного рівня передачі даних зі штучним інтелектом	03.04.2023р.	
5.	Дослідження мережевого рівня з підтримкою штучного інтелекту	05.05.2023р.	
6.	Аналіз економічної ефективності	19.05.2023р.	
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	31.05.2023р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	13.06.2023р.	
9.	Нормоконтроль, попередній захист, опонування МКР	15.06.2023р.	
10.	Захист МКР ЕК	16.06.2023р.	

Студент


(підпис)

Якубівська Н.В.

Керівник роботи


(підпис)

Васильківський М.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.391

Якубівська Н. В. Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом – магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – Телекомунікаційні системи та мережі – Вінниця: ВНТУ 2023 р. 182 – стор., 45 – рис., 23 – табл., 58 – бібл. – українською мовою.

При дослідженні систем 6G було визначено декілька відмінностей між стільниковими системами 5G та системами 6G. Зокрема, визначено 5 ключових сценаріїв використання систем 6G. Досліджено технічні виклики пов'язані з 6G. Розглянуто основні переваги терагерцового зв'язку. Розглянуто основні переваги використання відкритого радіочастотного діапазону (O-RAN) для мобільних операторів. Визначено, що мережі, орієнтовані на стільники мають певні обмеження в забезпеченні якісного зв'язку у рухомому транспорті або в зоні перепадів між макро- та мікросередовищами. Визначено, що інтегрована мережа між наземними та стільниковими мережами дійсно може підвищити цінність мереж 6G. Розглянуте кодування каналів є важливою частиною розробки мереж 6G, оскільки воно дозволяє забезпечити високу якість передачі даних. Досліджено мережі 6G із більш гнучким розподіленням спектру за рахунок використання не тільки спектру, але й часу та інших мережевих ресурсів. Обґрунтовано корисність алгоритмів ШІ та МН для оптимізації мережі 6G та покращення її продуктивності. Розглянуто сценарій використання алгоритмів ШІ та МН в системах 6G. Досліджено, що алгоритми ШІ та МН можуть бути використані для оптимізації розподілу ресурсів мережі, що дозволить забезпечити кращу продуктивність та якість обслуговування користувачів. Показано, що алгоритми ШІ та МН можуть бути корисними на мережевому рівні для різних функцій.

Ключові слова: протокол керування доступом та мобільністю, модернізована універсальна наземна мережа радіодоступу, базова приймально-передавальна станція, модернізована вузлова базова станція, штучний інтелект.

ABSTRACT

UDC 621.391

Yakubivska N. V. Research of 6G mobile networks with built-in artificial intelligence - Master's thesis in specialty 172 - Telecommunications and Radio Engineering, Educational program - Telecommunication systems and networks - Vinnytsia: VNTU, 2023. 182 p., 45 figs., 23 tables, 58 bibliography - in Ukrainian.

In the study of 6G systems, several differences between 5G cellular systems and 6G systems were identified. In particular, 5 key scenarios for the use of 6G systems have been identified. The technical challenges associated with 6G are investigated. The main advantages of terahertz communication are considered. The main advantages of using the open radio frequency range (O-RAN) for mobile operators are considered. It is determined that cellular networks have certain limitations in providing high-quality communication in moving vehicles or in the zone of differences between macro- and microenvironments. It has been determined that an integrated network between terrestrial and cellular networks can indeed increase the value of 6G networks. The considered channel coding is an important part of the development of 6G networks, as it allows to ensure high quality data transmission. The 6G networks with more flexible spectrum allocation due to the use of not only spectrum, but also time and other network resources are investigated. The usefulness of AI and ML algorithms for optimizing the 6G network and improving its performance is substantiated. The scenario of using AI and ML algorithms in 6G systems is considered. It has been shown that AI and ML algorithms can be used to optimize the allocation of network resources, which will provide better performance and quality of user service. It is shown that AI and ML algorithms can be useful at the network level for various functions.

Keywords: access and mobility management protocol, modernized universal terrestrial radio access network, base transceiver station, modernized node base station, artificial intelligence.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	10
1 ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ 6G.....	18
1.1 Обґрунтування технологічних вимог впровадження радіосистем 6G.....	18
1.2 Аналіз етапів розвитку технологій побудови безпроводних мереж.....	20
1.3 Методи впровадження технологій 6G в радіомережах наступного покоління.....	26
2 БЕЗПРОВІДНІ МЕРЕЖІ 6G ІЗ ПІДТРИМКОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.....	45
2.1 Особливості застосування штучного інтелекту та машинного навчання у фізичні рівні мережі.....	45
2.2 Особливості застосування штучного інтелекту та машинного навчання на каналному рівні мережі.....	54
3 ФІЗИЧНИЙ РІВЕНЬ ЗІ ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ.....	64
3.1 Особливості проектування фізичного рівня мережі 6G зі штучним інтелектом.....	65
3.2 Особливості розроблення математичних моделей бездротових каналів.....	75
3.3 Математичні моделі систем МІМО із використанням штучного інтелекту..	77
4 ДОСЛІДЖЕННЯ КАНАЛЬНОГО РІВНЯ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ЗІ ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ.....	93
4.1 Особливості проектування каналного рівня мережі 5G NR з штучним інтелектом.....	94
4.3 Алгоритм роботи каналів передавання мобільної мережі з використанням методів штучного інтелекту.....	103
5 МЕРЕЖЕВИЙ РІВЕНЬ З ПІДТРИМКОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ.....	106
5.1 Особливості проектування мережевого рівня з використанням машинного навчання.....	106
5.2 Розрахунок структури мобільної системи та топології радіомережі.....	122
6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	137
6.1 Оцінювання наукового ефекту.....	137
6.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	140

6.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи.....	151
6.4 Висновок до розділу 6.....	152
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	153
7.1. Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	154
7.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	158
7.3 Оцінка радіаційного захисту підвального приміщення.....	165
ВИСНОВКИ.....	170
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	179
ДОДАТКИ.....	184
ДОДАТОК А.....	185
ДОДАТОК Б.....	195
ДОДАТОК В.....	196
ДОДАТОК Г.....	197
ДОДАТОК Д.....	198
ДОДАТОК Е.....	199
ДОДАТОК Ж.....	200
ДОДАТОК К.....	201

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

3GPP - Проект партнерства 3-го покоління
5G - П'яте покоління
5GC - Ядро 5G
6G - Шосте покоління
ADC - Аналого-цифровий перетворювач
AGI - Штучний загальний інтелект
AI - Штучний інтелект
AID - Автоматичне виявлення взаємодії
AMF - Функція управління доступом і мобільністю
ANI - Штучний вузький інтелект
ANN - Штучна нейронна мережа
API - Інтерфейс прикладного програмування
APSK - Амплітудно-фазова маніпуляція
AQM - Активне керування чергою
ARIMA - Інтегрована авторегресійна ковзна середня
ASI - Штучний супер інтелект
ASIC - Прикладна інтегральна схема
AuC - Центр аутентифікації
AWGN - Адитивний білий гаусівський шум
BackCom - Зв'язок із зворотним розсіюванням
BCD - Заблоковані виклики з затримкою
BER - Коефіцієнт бітових помилок
BF - Перестановка бітів
BLER - Блокова частота помилок
BS Базова станція
BSS - Підсистема базових станцій
BTS - Базова приймально-передавальна станція
BW - Смуга пропускання
CAPEX - Капітальні витрати
CART - Класифікаційно-регресійне дерево
CBR - Постійна швидкість передачі даних
CDMA - Множинний доступ з кодовим поділом каналів

CLS - Концептуальна система навчання
CN - Основна мережа
CNN - Згорткова нейронна мережа
CoMP - Координована багатоточкова система
COST - Комерційні готові рішення
CPU - Центральний процесор
CQP - Опукле квадратичне програмування
C-RAN - Хмарна або централізована мережа радіодоступу
CRC - Циклічна перевірка надлишковості
CSI - Інформація про стан каналу
CSMA/CA - Множинний доступ з урахуванням несучої/попередження колізій
CU - Централізований блок
CUPS - Розділення площини керування та площини користувача
CWT - Безперервне вейвлет-перетворення
DAS - Розподілені антенні системи
DCI - Керуюча інформація низхідного каналу
DM-RS - Демодуляція опорного сигналу
DNN - Глибока нейронна мережа
DoS - Відмова в обслуговуванні
DP - Динамічне програмування
DPSK - Диференціальна фазова маніпуляція
DU - Розподілений блок
DWT - Дискретне вейвлет-перетворення
ЕС - Європейська комісія
EDA - Електронна автоматизація проектування
eMBB - Покращений мобільний широкосмуговий зв'язок
EPC - Еволюційне пакетне ядро
FCC - Федеральна комісія зв'язку
FDD - Дуплекс з частотним розділенням каналів
FDMA - Множинний доступ з частотним розділенням каналів
FEC - Пряма корекція помилок
GDPR - Загальний регламент захисту даних
GEO - Геостаціонарні супутники
GFMC - Узагальнене частотне мультиплексування

GMSC - Шлюз мобільного комутаційного центру
GPRS - Загальна служба пакетного радіозв'язку
GPU - Графічний процесор
GRAN - Мережа радіодоступу GSM
GRU - Закритий рекурентний блок
HAPS - Висотні псевдосупутники
HARQ - Гібридний автоматичний повторний запит
HMM - Прихована марковська модель
HW - Апаратне забезпечення
IAB - Інтегрований доступ і транзит
IEEE - Інститут інженерів з електротехніки та електроніки
IMEI - Міжнародний ідентифікатор мобільного обладнання
IoT - Інтернет речей
IP - Інтернет-протокол
IPI - Міжпакетний інтервал
IPM - Метод внутрішніх точок
IQ - Синфазна та квадратурна фаза
ISDN - Цифрова мережа з інтегрованими послугами
MSE - Міжнародний союз електрозв'язку
LEO - Низькоорбітальні супутники
MC - Монте-Карло
MDP - Марковський процес прийняття рішень
MEC - Багатодоступні периферійні обчислення
MF - Узгоджений фільтр
MIMO - Багатоканальний вхід і багатоканальний вихід
MIT - Час переривання мобільності
ML - Машинне навчання або метод максимальної правдоподібності
MME - Об'єкт управління мобільністю
MMSE - Мінімальна середньоквадратична похибка
mMTC - Масові комунікації машинного типу
MRP - Марковський процес винагороди
MS - Мобільна станція
MSC - Мобільний центр комутації
NFV - Віртуалізація мережевих функцій

NMI - Нормалізована взаємна інформація
NNP - Нейромережеві процесори
NOMA - Неортогональний множинний доступ
NP - Недетермінований поліном
NR - Нове радіо
OFDMA - Ортогональний множинний доступ з частотним розділенням каналів
OMA - Ортогональний множинний доступ
OPEX - Операційні витрати
O-RAN - Відкрита мережа радіодоступу
OS - Операційна система
OSI - Відкритий взаємозв'язок систем
OSTBC - Ортогональний просторово-часовий блоковий код
PCA - Аналіз головних компонент
PCR - Регресія головних компонент
PDCP - Протокол конвергенції пакетних даних
PGW - Мережевий шлюз пакетних даних
PSO - Оптимізація рою частинок
PSS - Первинний сигнал синхронізації
PSTN - Телефонна мережа загального користування
QAM - Квадратурна амплітудна модуляція
QoE - Якість обслуговування
QoS - Якість обслуговування
QPSK - Квадратурна фазова маніпуляція
RAN - Мережа радіодоступу
RB - Ресурсний блок
RED - Випадкове раннє виявлення
RF - Радіочастота
RFID - Радіочастотна ідентифікація
RL - Навчання з підкріпленням
RLC - Управління радіоканалом
RMS - Середньоквадратичне значення
RMSE - Середньоквадратична похибка
RNN - Рекурентна нейронна мережа
RRC - Контроль радіоресурсу

RSSI - Індикатор рівня прийнятого сигналу
RTS - Запит на відправку
RU - Радіоприймач
SBA - Сервіс-орієнтована архітектура
SDU - Службовий блок даних
SEAL - Рівень архітектури, що забезпечує надання послуг
SGW - Обслуговуючий шлюз
SIC - Послідовне придушення завад
SINR - Відношення сигнал/завада
SIoT - Соціалізований Інтернет речей
SISO - Один вхід/один вихід
SMF - Функція управління сеансом
SNR - Відношення сигнал/шум
SNS - Розумні мережі та сервіси
SOCP - Конусне програмування другого порядку
SSS - Вторинний сигнал синхронізації
STBC - Просторово-часовий блоковий код
STTC - Просторово-часовий код решітки
SVM - Машина опорних векторів
SW - Програмне забезпечення
TCP - Протокол керування передачею
TDD - Дуплекс з часовим поділом
TDMA - Множинний доступ з часовим розділенням каналів
TPU - Блок тензорної обробки
UAV - Безпілотний літальний апарат
UCI - Інформація управління висхідним зв'язком
UDN - Надщільні мережі
UDP - Користувацький протокол дейтаграм
UE - Користувацьке обладнання
UFMC - Універсальна фільтрована багатонесуча система
UMTS - Універсальна мобільна телекомунікаційна служба
URLLC - Ультранадійний зв'язок з низькою затримкою
UTRAN - Універсальна мобільна телефонна система RAN
VLR - Реєстр місцезнаходження відвідувачів

VLSI - Дуже велика інтеграція

WCDMA - Широкопasmовий множинний доступ з кодовим поділом каналів

WMMSE - Зважена мінімальна середньоквадратична похибка

XLA - Прискорена лінійна алгебра

ZF - Нульове прискорення

ВСПУП

Актуальність теми. Телекомунікаційні системи мобільного зв'язку отримали поступовий розвиток із врахуванням одночасної експлуатації різного рівня мережевого обладнання. Так само телекомунікаційне обладнання на базі технології 4G постійно модифікується, отримуючи нові функції та розвивається до рівня телекомунікаційних систем на базі технології 5G. Поступове розгортання систем 5G вказує на тривалий перехід на телекомунікаційну технологію 5G у порівнянні із періодом впровадження технології 4G, оскільки при цьому має бути впроваджено багато нових функцій. В результаті, одночасно із оптимізацією вже впроваджених систем 5G, провідні фахівці стільникового зв'язку та мереж почали досліджувати телекомунікаційні системи на базі технології 6G, яка революціонізує бездротовий зв'язок і мережі з більшими вимогами, ніж системи 5G [1]. Використання кардинального підходу до реалізації систем 6G дозволить переосмислити комунікації та мережі залежно від необхідних інформаційних послуг. Штучний інтелект (AI) та машинне навчання (ML) є одними з ключових технологій для телекомунікаційних систем 6G. AI та ML є зрілими технологіями та значно вдосконалюють багато різних галузей досліджень, пронизують усі аспекти життєдіяльності людства. Таким чином, очікується значне підвищення ефективності існуючих робочих місць, а також створення нових програм та послуг. AI відіграватиме вирішальну роль у бездротовому зв'язку та мережах і змінить методику проектування та керування зв'язком і мережами 6G. При цьому, що штучний інтелект зробить комунікації та мережеве проектування й керування розумнішим і безпечнішим. Тому ключовим питанням є особливості впровадження штучного інтелекту у системах зв'язку 6G [2].

Прогалини поточної системи стільникового зв'язку визначають напрямок вдосконалення апаратно-програмного забезпечення в майбутній системі. Наприклад, конфіденційність і безпека є одним із недоліків стільникової системи для розширення приватних інформаційних послуг. Тому, вони будуть основною частиною розвитку телекомунікаційних технологій. У телекомунікаційних системах 3G однією з ключових функцій була послуга високої швидкості передачі даних, а цільовою основною програмою був веб-перегляд, який не був досить успішним. За допомогою економічно ефективних

рішень в телекомунікаційних системах 4G забезпечено високу швидкість передачі даних, включаючи передачу відео та перегляд веб-сторінок. Усі функції систем 6G не будуть задоволені одночасно. Для виконання всіх функціональних вимог знадобиться деякий час, оскільки розвиток, удосконалення та впровадження одного покоління стільникових мереж триває 10 років. Системи 6G будуть поступово розвиватися та розгортатися разом із новим функціоналом телекомунікаційного обладнання. Крім того, існує великий розрив між теоретичною роботою та практичним впровадженням. Хоча деякі технології теоретично забезпечують високу продуктивність і їх впровадження в лабораторних масштабах є успішним, а комерційне виробництво та розгортання можуть бути неможливими. На практиці вони не працюють так добре, як очікувалось, зокрема, є багато успішних демонстрацій технологій антенних решіток у лабораторному масштабі, але вони все ще не готові для розгортання в практичних стільникових системах [3].

Станом на 2023 рік системи 5G розгортаються в багатьох містах, але їх функції не використовуються у повному обсязі. Першим етапом розгортання технології 5G є впровадження програм розширеного мобільного широкопasmового зв'язку (eMBB). Другим етапом впровадження систем 5G є наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC) і автономні системи систем 5G [4]. Подібно попереднім поколінням телекомунікаційного обладнання, системи 6G розширять можливості мереж 5G і забезпечать ринок інформаційних послуг новими додатками та послугами. Оскільки співпраця між галузями є ключовим аспектом систем 5G, які впливають на телекомунікаційну галузь, а також на інші галузі, такі як автомобільна, охорона здоров'я, харчова, автоматизації виробництва та інших, технології 6G будуть відповідати підходам технологій 5G, включаючи міжгалузеву співпрацю та створення нових програм. Дослідження телекомунікаційного обладнання 6G було розпочато в фокус-групі Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU) з технологій для мережі 2030 (FG NET 2030). При цьому, розглянуто майбутню мережеву архітектуру, вимоги, сценарії використання та можливості майбутніх мобільних мереж до 2030 року, а також перші результати досліджень стосувались технології, програми та рушійний сил телекомунікаційного ринку за межами технології 5G. Отже, розгортання мереж 6G може початися з 2030 року і буде перекиватися системами 5G, як це зроблено для попередніх

стільникових систем. При розробленні концепції систем 6G були запропоновані нові функції та програми, зокрема компоненти зв'язку та мережі з підтримкою AI. Алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання допоможуть оптимізувати бездротові системи, покращити продуктивність мережі та створити нові сервіси та програми [5].

Міжнародний регулятор ITU визначає розподіл спектру технології 6G для різних послуг і програм. При цьому, робоча ширша смуги пропускання систем 6G дозволяє підтримувати підвищені швидкості передачі даних та збільшений обсяг інформаційного трафіку. Таким чином, розподіл спектру 6G відіграватиме важливу роль в процесі проектування систем та мереж 6G.

У системах та мережах 6G розподіл спектру поширюється в діапазоні терагерцових частот. Регіональні регулюючі органи, такі як Європейська конференція поштових і телекомунікаційних адміністрацій (CEPT) в Європі та Федеральна комісія зв'язку (FCC) в США відіграють досить важливу роль у процесі прийняття рішень в ITU. Рекомендації ITU визначить вимоги до технології побудови систем та мереж 6G, потенційні програми та послуги. Фактичні характеристики технології 6G можна знайти в роботах 3GPP або IEEE. Тому, для розробки технічних специфікацій систем 6G бездротовий канал 6G визначається в 3GPP або IEEE. При цьому, розробляється його математична модель і планується сценарій тестування для оцінки запропонованих технічних рішень або алгоритмів. В результаті, у стільникових системах в основному використовуються емпіричні моделі каналів, такі як моделі каналів ITU. Їхні тестові сценарії також відрізняються. Тому, кожен блок бездротового зв'язку та мережевих систем вибирається відповідно до вимог систем 6G. Цей крок обговорюється та визначається в стандартах бездротового зв'язку, таких як 3GPP та IEEE. Отже, постачальники або оператори стільникових мереж розроблятимуть мережеві компоненти та послуги.

Аналіз останніх досліджень. Значна кількість нових програм та послуг у системах 6G зумовлює зростання взаємодії між людиною та машиною. Нові програми та послуги вимагатимуть вищих вимог до функціональних параметрів телекомунікаційного обладнання у порівнянні із системами 5G. Зокрема, можна охарактеризувати п'ять ключових випадків використання систем 6G: величезні прикладні програми для наукових даних, пакетне пересилання даних з урахуванням додатків, порятунк у надзвичайних ситуаціях і катастрофах,

соціалізований Інтернет речей, а також зв'язок і спільний доступ до широко розповсюджених даних AI, моделей і знання. При цьому, величезні програми для наукових даних охоплюють масштабні наукові програми, такі як астрономічні телескопи тощо [6]. В процесі зміни технологій побудови систем від 1G до 5G значно збільшились трафік інформаційних даних та пропускна здатність телекомунікаційних мереж. Оскільки багато прикладних програм наукових даних потребують величезного трафіку даних, пропускна здатність мережі 6G може досягати 1 Тбіт/с, що дозволяє забезпечити оброблення величезної кількості даних. Наприклад, інтерферометрія з дуже довгою базовою лінією складається з кількох розподілених телескопів для спостереження за небом. При цьому, кожен телескоп створює величезну кількість даних та передає їх на шлюз для комплексного аналізу даних. Тому висока пропускна здатність є однією з ключових вимог. Поточний попит на пропускну здатність становить 100 Гбіт/с, а найближчим часом буде потрібно 1 Тбіт/с. Оскільки, розподілені телекомунікаційні мережі засновані на аналізі даних в реальному часі, тому також важливими вимогами є низька затримка та висока надійність. Оскільки, для аналізу даних необхідний збір даних з усіх вузлів, тому якщо отримання даних з одного вузла затримується, і при цьому відсутня можливість їх синхронізувати, тоді інтегрований аналіз також буде відкладено. Низькі втрати пакетів і висока надійність також мають вирішальне значення при отриманні високоточних результатів оброблення наукових даних [7].

Для мінімізації затримки наскрізної передачі та покращення продуктивності мережі буде корисним пакетне пересилання даних з урахуванням задіяного програмного забезпечення, що дозволить скоротити час передачі даних. Інформаційні пакети передаються послідовно та приймаються на вузлах призначення з низькою затримкою. Наприклад, під час потокової передачі відео пакет включає відео кілька зображень та звукового супроводу. Для усунення будь-яких перевантажень в телекомунікаційній мережі створюються віртуальні канали. При цьому, вузли призначення обробляють інформаційні пакети одразу по черзі. Такий підхід дозволяє прискорити наскрізну передачу, а також оптимізувати мережеві ресурси. Отже, для підтримання пакетного пересилання даних у мережі потрібна передача з

низькою затримкою, віртуальний канал, що підтримує пакетне пересилання, а також керування ресурсами та планування пакетної передачі.

Вимоги до мережі повинні враховувати два типи даних: добре структуровану і невелику за обсягом контрольну інформацію та великий обсяг інформації від експертного об'єкта. Обсяг інформаційного трафіку в телекомунікаційній мережі повинен бути невеликим, а пакети даних мають бути пріоритетними. Таким чином, забезпечується зменшення затримки і тривалості реакції на аварійні ситуації в будь-який час і в будь-якому місці. При передачі великого обсягу даних, таких як високоякісне відео, необхідно забезпечити достатній резерв пропускної здатності із врахуванням пріоритетної передачі даних. Надійність і точність передачі є одними з ключових вимог у звичайних стільникових системах. У випадках аварійно-рятувальних робіт вони є особливо важливими, оскільки деякі попереджувальні повідомлення повинні передаватися в райони аварійно-рятувальних робіт з високою точністю та низькою затримкою. Крім того, системи дистанційного керування, включаючи дистанційну хірургію та дистанційне ультразвукове обстеження вимагають наднизької затримки та низького джитеру. За допомогою технологій 5G було реалізовано мережеву інфраструктуру і частково задоволено системні вимоги телекомунікаційних радіомереж спеціального призначення. Вища продуктивність мереж нового покоління призводить до більшого відсотку врятованих людей. Таким чином, системи 6G мають покращити ефективність використання телекомунікаційних радіозасобів в надзвичайних ситуаціях і катастрофах при наданні допомоги будь-де, будь-коли і будь-кому [8].

Кількість пристроїв Інтернету речей швидко зростає та наближається до 10 мільярдів [5]. Необхідність керування величезною кількістю даних від пристроїв IoT в одній централізованій системі зумовлює перевантаження мережевого трафіку. На відміну від цього підходу, соціалізований Інтернет речей (SIoT) є децентралізованим, що забезпечує взаємозв'язок між об'єктами. SIoT дозволяє просто встановлювати з'єднання між об'єктами з різними рівнями безпеки, а також робить можливим виявлення послуг на різних платформах. Наприклад, логістичні компанії розглядають цей варіант використання для мінімізації витрат і підвищення стійкості. Мережа встановлює функції та API для реалізації віртуальних об'єктів і дозволяє їм взаємодіяти з іншими віртуальними об'єктами.

Таким чином, можна контролювати логістичні активи, збирати дані з навколишнього середовища та оптимізувати процес. SІoT відіграватиме важливу роль в контексті мережевої інфраструктури. Ключові мережеві вимоги SІoT подібні до традиційних вимог ІoT, таких як енергоефективність, безпека, обчислювальна потужність і зберігання даних на периферійних мережах. На додаток до цього, вони вимагають відкритих мережевих сервісних інтерфейсів і віртуалізації об'єктів для підтримки соціальних зв'язків між пристроями SІoT. При використанні інтелектуальних та рухомих об'єктів, таких як БПЛА необхідно підтримувати низьку затримку і високу мобільність.

Зв'язок та спільне використання широко розподілених даних штучного інтелекту забезпечує нове рішення для ІoT. У системах Інтернету речей 6G інтелектуальні об'єкти можуть приймати рішення автономно та інтерактивно з людиною, використовуючи алгоритми ШІ. Широке поширення алгоритмів штучного інтелекту стане радикальною зміною системи Інтернету речей. Робочі навантаження і дані ШІ будуть розподілені по глобальній системі ШІ з точки зору конкретних додатків і системних вимог. Багато компонентів ШІ всередині пристроїв Інтернету речей можуть бути об'єднані в пул. Така децентралізована і кооперативна система зможе ділитися ресурсами ШІ з іншими системами. Для цього мережі повинні підтримувати зв'язок між пристроями, самоорганізацію, гнучку автентифікацію, розширення мережі [1].

Мета і завдання роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження і вдосконалення передових технологій зв'язку та обробки даних для надання швидкого, надійного та інтелектуального зв'язку між різними пристроями та системами.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- дослідження технологій побудови інфокомунікаційних мереж 6G;
- дослідження безпроводних мереж 6G із підтримкою штучного інтелекту;
- дослідження фізичного рівня безпроводної мережі зі штучним інтелектом;
- дослідження каналного рівня передачі даних зі штучним інтелектом;
- дослідження мережевого рівня з підтримкою штучного інтелекту.

Об'єктом дослідження є мобільна мережа та всі її складові компоненти, всі аспекти, пов'язані з використанням штучного інтелекту в мобільних

мережах 6G, з метою покращення продуктивності, якості обслуговування, ефективності ресурсів, безпеки та інших характеристик мережі.

Предметом дослідження є нові алгоритми і методи для підтримки штучного інтелекту в мобільних мережах 6G.

Методи досліджень базуються на використанні: методів моделювання та симуляції, що дозволяє аналізувати та оцінювати різні аспекти мобільних мереж 6G з вбудованим штучним інтелектом, зокрема моделювання каналів зв'язку, алгоритмів керування ресурсами, протоколів передачі даних та інших компонентів мережі; методів експериментальних досліджень у контрольованому середовищі або на польових тестових майданчиках, що дозволить збирати дані та отримувати практичні відомості про роботу мобільних мереж 6G з вбудованим штучним інтелектом, зокрема включати випробування нових алгоритмів, прототипування нових пристроїв та систем, а також вимірювання ефективності та продуктивності; методи аналізу даних для обробки та вивчення інформації, зібраної з реальних мереж або симуляційних середовищ, що дозволить виявити тенденції, патерни та залежності у роботі мобільних мереж 6G з вбудованим штучним інтелектом, зокрема використання статистичних методів, машинного навчання та інших аналітичних підходів для виявлення корисної інформації та встановлення зв'язків між різними факторами.

Новизна одержаних результатів:

- досліджено інтеграцію штучного інтелекту в мобільні мережі 6G, зокрема одним з ключових аспектів новизни є саме поєднання мобільних мереж 6G з штучним інтелектом. Це означає використання інтелектуальних алгоритмів та методів для оптимізації, керування ресурсами, прийняття рішень та інших аспектів мережі, що дозволяє досягти високої продуктивності та забезпечити нові можливості.

- розглянуто застосування штучного інтелекту для автоматизації та оптимізації, зокрема використання штучного інтелекту в мобільних мережах 6G відкриває широкі можливості для автоматизації та оптимізації різних процесів. Це може включати автоматичне управління ресурсами, оптимізацію енергоспоживання, прогнозування навантаження, аналіз даних для прийняття рішень та інші інтелектуальні функції.

- отримано підвищення продуктивності мережі та якості інформаційних послуг за рахунок впровадження штучного інтелекту в мобільні мережі 6G, зокрема застосування інтелектуальних алгоритмів може забезпечити більш ефективне використання ресурсів, зменшення затримок, підвищення пропускнуої здатності та забезпечення надійної комунікації.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на ІІІ науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету у 2023 році.

Публікації результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні положення кваліфікаційної роботи висвітлені у 7 наукових публікаціях, зокрема 2 статтях у фахових журналах, що входять до переліку ВАК України, 5 тезах науково-технічних конференцій

1 ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ 6G

1.1 Обґрунтування технологічних вимог впровадження радіосистем 6G

Ключові вимоги до телекомунікаційної мережі можна підсумувати наступним чином: 1. Віртуалізація. При цьому, рішення на основі штучного інтелекту вписуються в концепцію віртуалізації, що дозволить легко знизити витрати на розгортання. 2. Мережева оркестрація. Для забезпечення синергії обчислювальних, кешувальних і комунікаційних ресурсів концепція мережевої оркестрації буде корисною для роботи систем ШІ. 3. Оптимізація пропускної здатності мережі. Масивні інтелектуальні об'єкти генеруватимуть великі обсяги даних, а система ШІ використовуватиме їх для навчання. Таким чином, необхідна велика пропускна здатність мережі із обов'язковою оптимізацією. 4. Низька затримка. При необхідності здійснення рішення в реальному часі, передача даних між об'єктами повинна бути максимально швидкою та підтримувати прийняття рішень в реальному часі. 5. Інтероперабельність. Для підтримки телекомунікаційних рішень зі штучним інтелектом необхідні уніфіковані мережеві інтерфейси для їх обслуговування і повторного використання ШІ та мережевих ресурсів. 6. Програмованість мережі. Застосування мережевої програмованості зумовлена необхідністю динамічного обміну даними змінного розміру та компонентами ШІ. Таким чином, можна розпізнавати телекомунікаційні об'єкти і перенаправляти їх до різних мереж. 7. Безпека. Необхідність забезпечення різних рівнів безпеки зумовлена тим, що більшість даних в мережі пов'язані з приватними або захищеними пристроями. Таблиця 1 представляє відповідні вимоги до мережі з точки зору п'яти варіантів використання [2].

У таблиці 1.1 визначено п'ять критеріїв оцінювання параметрів телекомунікаційних систем за шкалою від 1 до 10. Чим більше значення, тим важливіше. Пропускна здатність (BW) включає декілька аспектів, таких як пропускна здатність, якість обслуговування, гнучкість та адаптивність транспортної мережі.

Таблиця 1.1 – Оцінювання абстрактних вимог до систем 6G із врахуванням п'яти варіантів застосування

Випадки використання	BW	Час	Безпек а	AI	MN
Застосування великих наукових даних (HSD)	10	9	6	6	9
Пакетна пересилка даних з урахуванням програмного додатку (ABF)	8	5	2	2	2
Екстрена допомога та рятування при стихійних лихах (EDR)	5	6	9	8	5
Соціалізований Інтернет речей (SIoT)	7	9	9	7	8
Зв'язок і спільний доступ до розповсюджених даних, моделей і знань штучного інтелекту (CSAI)	8	9	8	8	8

Пропускна здатність є найважливішим параметром для застосунків: HSD, ABF і CSAI в яких буде оброблятися величезна кількість переданих даних. Безумовно, це ключовий показник систем 6G. Часові характеристики враховують параметри затримки, синхронізації, джитеру, точності планування і точності геолокації. Зокрема, затримка поширення сигналів відіграє ключову роль у високошвидкісних телекомунікаційних мережах 6G. Безпека мережі передбачає контроль інформаційної безпеки, конфіденційності, надійності та достовірності переданих інформаційних даних. Безпека пов'язана з більшістю варіантів використання сучасного телекомунікаційного обладнання. З точки зору конкретних сценаріїв використання телекомунікаційного обладнання повинні бути забезпечені різні рівні інформаційної безпеки. У системах 6G і наступних поколіннях важливість безпеки і захисту конфіденційності зростатиме. ШІ передбачає обчислення, зберігання, моделювання, збір і аналіз даних, а також можливість програмування. Варіант використання CSAI тісно пов'язаний з аспектом штучного інтелекту. ManyNet (MN) включає в себе адресацію, мобільність, мережевий інтерфейс і конвергенцію гетерогенних мереж. ManyNetwork - це гетерогенність фізичних і логічних моделей, яка передбачає безперешкодну роботу в Інтернеті гетерогенних мереж і пристроїв [3].

Інший погляд на архітектуру мереж 6G можна підсумувати так:

вирішення соціальних проблем, комунікація між людьми і речами, розширення комунікаційного середовища та вдосконалення кібер-фізичного злиття.

В мережах 6G багато інформаційних послуг, таких як дистанційна робота, телемедицина, дистанційне навчання та автономна робота будуть реалізовані за допомогою високошвидкісного зв'язку та мереж з низькою затримкою. При впровадженні засобів надання послуг Інтернету речей зростає попит на забезпечення зв'язку між ними. При цьому, в системах 6G будуть використовуватися пристрої Інтернету речей з більш високими вимогами, такими як обробка зображень у форматі 4K або 8K і контроль затримки поширення та оброблення даних. Крім того, комунікаційне середовище буде розширюватися в багатьох напрямках. Безумовно, висотні будівлі, дрони, літаки і літаючі таксі отримають якісні рішення для зв'язку за рахунок використання технології 6G. Нарешті, багато речей, таких як транспортні засоби, машини, камери і датчики, будуть з'єднані в кіберпросторі. У системах 6G буде впроваджено набагато більше послуг, що використовують кібер-фізичний синтез. Отже, системи 6G забезпечують передавання великого об'єму оброблюваних даних між кіберпростором та фізичним простором із дотриманням достатнього рівня інформаційної безпеки користувачів. Для підтримки чотирьох варіантів використання 6G необхідно задовольнити нові комбінації вимог. Наприклад, застосування масового машинного зв'язку (mMTC) вимагає низької швидкості передачі даних і масового підключення в системах 5G. Однак пристрої Інтернету речей стають розумнішими і потребують підвищеної обчислювальної потужності. Інформаційні послуги IoT 6G вимагають підвищеної швидкості передачі даних. Таким чином, висока швидкість передачі даних та масове підключення до телекомунікаційних послуг формують нову комбінацію вимог для мереж доступу 6G.

1.2 Аналіз етапів розвитку технологій побудови безпроводних мереж

Нове покоління стільникових мереж з'являється кожні 10 років. Багато груп зі стандартизації, великих постачальників і мобільних операторів здійснюють розробку мереж 6G. У таблиці 2 наведено графік розвитку технологій 6G. У 15-й версії рекомендацій 3GPP визначено першу фазу 5G, що включає новий радіоінтерфейс (NR), мережу радіодоступу наступного

покоління (NG-RAN), ядро 5-го покоління (5GC), розбивку мережі на сегменти та периферійні обчислення. Перша фаза 5G була зосереджена на технологіях і додатках eMBB. У 16-й версії 3GPP визначено другу фазу 5G, що включає вдосконалену технологію "транспортний засіб до всього" (eV2X), URLLC, промисловий IoT, інтегрований доступ та транзитний зв'язок (IAB) і рівень архітектури, що забезпечує надання послуг (SEAL) для вертикальних мереж. Друга фаза 5G була розширена до технологій і додатків URLLC і V2X. Зокрема, технології IAB дозволяють здійснювати економічно ефективно розгортання мережі, спрощуючи підключення до радіоядра та зменшуючи складність і час розгортання мережі. Технологія IAB дозволяє розподіляти спектр між мережами доступу і транзитними мережами. Ключові особливості технології IAB можна підсумувати наступним чином: внутрішньосмуговий (дозволяється перекриття між каналом доступу і транзитним каналом) та позасмуговий (перекриття не дозволяється) транзит; підтримка неавтономного (NSA) і автономного (SA) режимів функціонування NR, автономна реконфігурація транзитних мереж. Впровадження технології NR для мереж URLLC передбачає підвищення надійності, зменшення затримок і жорстку синхронізацію. Для підвищення швидкодії оброблення даних на каналному рівні у фізичному каналі керування низхідним каналом передавання (PDCCH) підтримується компактна інформація керування низхідним лінійним трактом передавання (DCI). Технологія NR передбачає скасування UL, пріоритезацію, покращений контроль потужності та передачу без грантів. Крім того, рівень SEAL підтримує різні вертикалі і забезпечує керування групами, керування конфігурацією, керування розташуванням, керування ідентифікацією та керування мережевими ресурсами [4]. Підтримка прикладного рівня SEAL передбачає використання мережевої та позамережевої моделі. Мережева модель дозволяє підключити абонентське обладнання (UE) до радіомережі через інтерфейс Uu. Позамережева модель використовується, коли користувачеві потрібен інтерфейс PC5. Інтерфейс Uu призначений для реалізації зв'язку V2X, а інтерфейс PC5 - для прямого зв'язку між транспортними засобами. Потенційними можливостями 17-ї версії 3GPP (таблиця 2) є неземні мережі, нові частотні діапазони, NR sidelink і NR light [5]. Технологія 5G NR light (раніше - 5G NR RedCap (новий пристрій зі зниженим радіопоглинанням)) є однією з ключових функцій у 17-й версії стандарту. В результаті, пристрої NR

мають можливість компромісу між традиційними послугами eMBB та NB-IoT (або LTE-M) [6].

Релізи 3GPP, що охоплюють 6G будуть розроблятися до 2030 року, а нові функції будуть постійно обговорюватися і прийматися з 17 по 23 реліз. Отже, вимоги, оцінка та методологія для мереж 6G будуть розроблені до 2030 року. Європейська комісія (ЄК) ухвалила стратегічне партнерство щодо інтелектуальних мереж і послуг (SNS) на шляху до впровадження мереж 6G. При цьому, SNS має дві мети: ЄК сприяє суверенітету технології 6G, впровадженню дослідницької програми та підготовці до якнайшвидшого впровадження систем 6G на ринку; ЄК прискорює розгортання 5G в Європі і сприяє цифровому та зеленому переобладнанню економіки. Стандарт IEEE 802.11 (WiFi) був вперше випущений в 1997 році. Швидкість передачі даних WiFi зросла з декількох Мбіт/с до декількох Гбіт/с. Швидкість і покриття покращувалися, додавалися нові функції. Ревізії WiFi можна підсумувати наступним чином: 802.11b, 802.11a, 802.11g, 802.11n (WiFi4), 802.11ac (WiFi5), 802.11ax (WiFi6), 802.11be (WiFi7).

Таблиця 1.2 – Етапи розвитку 6G

	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	
3GPP	Реліз 17 та 18 (5G Розширений)			Реліз 19 та 20 (5G Професійний та розширений)			Реліз 21, 22 та 23 (6G)				
ITU-R	ІМТ2030 Стратегії та технологічні тенденції			ІМТ2030 Вимоги			Перспективи ІМТ2030 (оцінювання та методологія)				
ITU-T	Прогнозування FG-ML5G та Net2030										
EU projects	Розумні мережі та послуги (SNS): Дослідження			Розумні мережі та послуги (SNS): Попередні стандарти та перевірка концепцій				Розумні мережі та послуги (SNS): Випробування			
IEEE	WiFi7, THz			WiFi8 та 9, Розвиток терагерцового діапазону							

Телекомунікаційне обладнання WiFi, що відповідає стандарту 802.11b підтримує максимальну швидкість передачі даних 11 Мбіт/с та працює на частоті 2,4 ГГц. Обладнання стандарту 802.11a працює на частоті 5 ГГц та

використовує технологію OFDM і підтримує максимальну швидкість передачі даних 54 Мбіт/с. Найпопулярніша версія обладнання WiFi на ринку відповідає стандарту 802.11g, яка сумісна зі стандартом 802.11b та підтримує максимальну швидкість передачі даних 54 Мбіт/с на частоті 2,4 ГГц. Необхідність забезпечення підвищеної швидкості передачі даних у малих стільникових мережах зумовила впровадження телекомунікаційного обладнання стандарту 802.11n (WiFi4), яке підтримує швидкість до 450 Мбіт/с за допомогою технології MIMO. Такі маршрутизатори працюють в діапазонах 2,4 і 5 ГГц. 802.11ac (WiFi5) та використовуючи технологію MIMO можуть створювати кілька потоків на кілька пристроїв і покращувати загальну пропускну здатність мережі [7].

Телекомунікаційне обладнання стандарту 802.11ax (WiFi6) має багато нових функцій: підтримка до 8×8 MIMO, забезпечення швидкості передавання даних до 9,6 Гбіт/с та уникнення заторів трафіку в громадських місцях. Телекомунікаційне обладнання стандарту 802.11be (WiFi7) має смугу пропускання 320 МГц, багатосмугову багатоканальну агрегацію, 16 потоків MIMO, 4096 QAM [8]. Тому, технологія WiFi буде продовжувати розвиватися і може відігравати важливу роль у системах 6G. Крім того, стандарт 3GPP визначає різні методи взаємодії технологій WiFi та LTE. Агрегація обладнання LTE-WLAN (LWA) визначається стандартом 3GPP. Більшість мобільних телефонів оснащені як LTE так і WiFi. Технологія LWA дозволяє використовувати обидва канали для єдиного трафіку шляхом координації на нижчих рівнях протоколу. В результаті, мобільний користувач може користуватися безперебійними послугами передачі даних з вищою пропускну здатністю мережі, а мобільний оператор може покращити використання системи та зменшити операційні витрати. При цьому, очікується синергія між системами WiFi і 6G та підвищення пропускну здатності на невеликих територіях.

У таблицях 1.3 та 1.4 узагальнено вимоги до технології 6G з точки зору фізичного рівня і мереж.

Таблиця 1.3 – Вимоги до фізичного рівня

	Носійна частота	Ширина смуги пропускання	Швидкість передавання даних	Затримка	Щільність підключення	Мобільність
IMT2020	до 100 ГГц	до 1 ГГц	Пікове значення (DL/UL): 20/10 Гбіт/с Значення для одного користувача (DL/UL): 100/50 Мбіт/с	Значення при передачі даних на рівні одного користувача 1 мс Значення для групових сигналів керування 20 мс	1 пристрій/м ²	до 500 км/год
IMT2030	до 300 ГГц	до 10 ГГц	Пікове значення (DL/UL): 200/100 Гбіт/с Значення для одного користувача (DL/UL): 1 Гбіт/с / 500 Мбіт/с	Значення при передачі даних на рівні одного користувача 0.5 мс Значення для групових сигналів керування 5 мс	10 пристроїв/м ²	до 1000 км/год

Таблиця 1.4 – Вимоги до мережевого рівня

	Нарізання	Розгортання сервісу за допомогою нарізки	Пропуск на здатність мережі	Аналіз на основі даних	Енергоспоживання	Обсяг покриття
NET 2020	Обмежений сервіс нарізки	Декілька годин	100 Гбіт/с та декілька мільярдів пристроїв	Централізовано в хмарі	Помірне	Окремо наземний і супутниковий
NET 2030	Комплексна послуга нарізки	Менше, ніж за кілька годин	1 Тбіт/с та трильйон пристроїв	Розподілені та на основі штучного інтелекту	Низьке	Інтегрований наземний та супутниковий

Для забезпечення вказаних в таблицях 1.3 та 1.4 функціональних параметрів телекомунікаційних систем необхідно вирішити багато технічних проблем. Зокрема, розробники бездротових комунікацій і мереж стикаються з багатьма технічними і нетехнічними проблемами при створенні нових послуг і підвищенні їхньої продуктивності. Основне бачення та технічний тренд технології 6G можна підсумувати наступним чином: підтримка вертикалей, підтримка різних типів мережевих архітектур, широке розповсюдження віртуалізації, підтримка мільйонних підключень і зв'язок на основі даних і мережі з ШІ та МН. Підтримка вертикальних (промислових) додатків є одним з ключових напрямків зростання бездротового зв'язку та мереж. Співпраця між різними галузями стане основним рушієм розвитку бездротових систем [8].

Гетерогенні мережі досліджувались в системах 4G і 5G, але їх розгортання було обмеженим. Для задоволення різноманітних вимог у мережах 6G необхідно впроваджувати різні типи мережевої архітектури. Наприклад, розподілена підтримка MIMO, зовнішня підтримка малих стільників, внутрішні і зовнішні розподілені антенні системи (DAS) [1]. Системи 5G побудовані з використанням концепції віртуалізації дозволяють надавати індивідуальні мережеві послуги з використанням технологій нарізки. Системи 6G збережуть цю технологію і розширять концепції віртуалізації, такі як O-RAN. Крім того,

штучний інтелект і машинний інтелект вже використовуються в багатьох додатках, оскільки алгоритми штучного інтелекту розвинені, а великі обсяги даних доступні в стільникових мережах. Таким чином, архітектура бездротових систем, заснована на рішеннях 3G та 4G змінить дизайн комунікаційних та мережевих компонентів. В результаті, з'являться нові функції базової станції, периферійних обчислень та мобільного комутаційного центру. Для вирішення технічних проблем при реалізації систем 6G першим кроком є оцінювання технічних умов, які можна підсумувати наступним чином: висока пропускна здатність в надщільних мережах (UDN), низька затримка зв'язку E2E, різноманітне розгортання мережі, гнучкість з використанням розподілених систем по всій мережі від краю до ядра, ефективні комунікації та мережі на основі AI- або ML-технологій, економічно ефективні мережеві рішення для сталого розвитку суспільства, безперешкодне підключення наземних, супутникових мереж і мереж на базі БПЛА, керування мобільністю в периферійних мережах, віртуалізація мереж і хмарні технології, нова стратегія використання спектру між неліцензованими та ліцензованими діапазонами, нові технології фізичного рівня, такі як терагерцовий зв'язок, розподілений масивний MIMO [2].

1.3 Методи впровадження технологій 6G в радіомережах наступного покоління

Ключові технології систем 6G можуть відповідати ключовим технологіям систем 5G, оскільки більшість ключових технологій 5G потребують подальшого розвитку і при цьому можуть бути адаптовані до систем 6G. Крім того, впровадження технологій 6G покращить фундаментальні стільникові мережі, додавши нові функції, такі як надширокий спектр, віртуалізована концепція, розподілені системи, інтегровані послуги, мережеві компоненти зі штучним інтелектом. На основі нових можливостей очікуємо зміну парадигми на економічно ефективні та сервіс-орієнтовані мережі [3].

Однією з ключових вимог до систем 6G є значно швидша передача даних, ніж у системах 5G. По суті, розширена смуга пропускання дозволяє підтримувати вищі швидкості передачі даних та збільшений обсяг мережевого трафіку. Робочі смуги частот систем 6G можуть знаходитись в діапазонах

довжин хвиль вище 95 ГГц. На рисунку 1 показані спектри робочих частот стільникових систем.

Багато постачальників мобільного зв'язку розглядають терагерцовий діапазон як відправну точку для експериментів з технологіями 6G. Терагерцові діапазони забезпечують величезну пропускну здатність, але з ними пов'язано багато технологічних проблем. Терагерцові діапазони, як і спектр mmWAVE, залежать від умов навколишнього середовища та погоди, а покриття терагерцових діапазонів становитиме 100 м через високий рівень завад та шуму [4].

Системи терагерцового зв'язку (також відомі як субміліметровий зв'язок) будуть ключовою частиною систем 6G, оскільки для використання технологій 6G, включаючи віртуальну реальність і потокове відео у форматі 8K, потрібна надширока смуга пропускання. Основні характеристики терагерцового діапазону можна підсумувати наступним чином: втрати на поглинання, ослаблення потужності сигналів в радіолінії, надширокопasmовість і надзвичайно спрямований промінь радіопередавача. Основними перевагами використання телекомунікаційного обладнання 6G є величезна пропускну здатність, мініатюрні антени, проникнення крізь непровідні матеріали, такі як одяг, дерево, пластмаси, кераміка і папір та мінімальний вплив на організм людини. З іншого боку, ключовими проблемами впровадження систем 6G є малий радіус дії через розсіювання і поглинання радіосигналів пилом і дощем, обмежена довжина поширення радіосигналів (не проникають крізь метал і воду), складність виявлення, висока вартість телекомунікаційного обладнання: детекторів, генераторів і модуляторів.

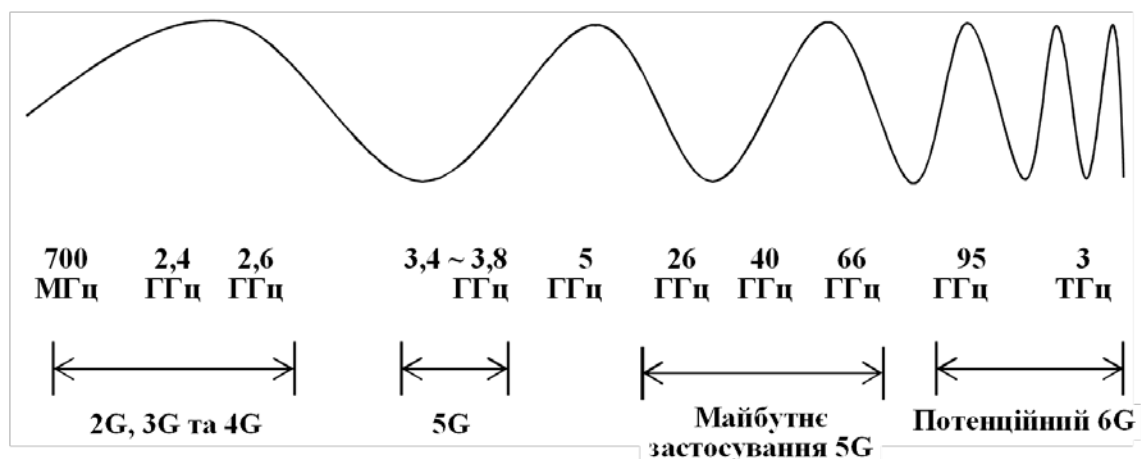


Рисунок 1.1 — Розширений спектральний діапазон радіосистем нового покоління

Мобільні мережі нового покоління складаються з мережі радіодоступу (RAN) та опорної мережі (CN). При цьому, мережа RAN з'єднує мобільні пристрої з основною мережею. Основним компонентом мережі RAN є базова станція, яка покриває певну територію з точки зору частотних діапазонів і планування стільникового зв'язку. Розроблено різновиди технології RAN для стільникових систем: GERAN (мережа радіодоступу GSM EDGE), UTRAN (універсальна система мобільного зв'язку RAN), E-UTRAN (розвинена універсальна наземна RAN) [5]. Базова мережа (ядро радіомережі) CN забезпечує контроль доступу, хендовер, маршрутизацію, комутацію, білінг та дозволяє мобільному користувачеві підключитися до Інтернету або встановити телефонний зв'язок. Традиційно, мобільні оператори мають одного постачальника для розгортання своєї основної мережі та декількох постачальників для розгортання мережі RAN. Оператори мобільного зв'язку прагнуть до гнучкого використання мобільного обладнання. Завдяки значному вдосконаленню технологій інтегрування (VLSI), таких як центральні процесори (CPU) і графічні процесори (GPU) стало можливим впроваджувати віртуальні мережеві компоненти, для збільшення гнучкості та масштабованості мережі. Такий підхід робить програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом більш привабливим варіантом для реалізації мереж радіодоступу наступного покоління. Переваги програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом зумовили створенням відкритих та інтелектуальних мереж радіодоступу. Зокрема, Open RAN (O-RAN) дозволяє використовувати змішані компоненти з більшою гнучкістю. Основними перевагами Open RAN є знижена собівартість мережевого обладнання, розширена адаптація, підвищена продуктивність мережі, підвищена сумісність, покращена інформаційна безпека [6]. В результаті, постачальники можуть мати розширений доступ до мережі із збільшеною гнучкістю, а мобільні оператори можуть обирати мережеве обладнання та рішення, що найкраще підходять для них. Основною концепцією Open RAN є відкритість протоколу та можливість побудови інтерфейсів між багатьма різними блоками. Основними структурними елементами O-RAN є радіостанція (Radio Unit, RU), розподілений блок (Distributed Unit, DU) та централізований блок (Centralized Unit, CU). ШІ або МН можуть відігравати важливу роль інтелектуального контролера RAN для оптимізації мережі Open RAN. Архітектура мережі Open RAN використовує інтелектуальний контролер

RAN з підтримкою III (RIC) для надання послуг у режимі, близькому до реального часу, і в режимі, відмінному від реального часу. На рис. 2 показано порівняння традиційної архітектури RAN, 5G vRAN та Open RAN.

Основною ідеєю мережі 5G vRAN та Open RAN є відокремлення програмного забезпечення від апаратного забезпечення та використання функції RAN на готових комерційних серверах (Commercial Off-the-Shelf, COTS). Такий підхід дозволяє мобільним операторам модулювати мережеві функції і зменшити операційні витрати. Технології vRAN та Open RAN впроваджують концепцію віртуалізації та підвищують ефективність мережевого обладнання. Однак ключовою характеристикою мережі Open RAN є характерна відкритість для забезпечення можливості працювати будь-якому постачальнику програмного забезпечення з обладнанням на основі COST через відкритий інтерфейс [7].

Зростання мережевого трафіку в геометричній прогресії та значне збільшення кількості макро-, піко- і фемтосот зумовлює розгортання надщільних мереж (UDN) на основі 6G технології із використанням різних типів високоуцільнених стільників в міських районах. При цьому, технологія UDN стикається з новими викликами, такими як різні типи розгорнутих мереж та високі завади між стільниками, оскільки підвищена щільність стільникового зв'язку спричиняє зростання завад. У традиційних стільникових мережах мобільні пристрої (обладнання користувачів (UE) або мобільна станція (MS)) підключаються до однієї стільникової мережі серед декількох доступних. Точки доступу (AP) або базові станції (BS) мають кілька мобільних пристроїв, які впливають на сусідні точки доступу або мобільні пристрої. У системах 4G прийнята концепція спільної обробки сигналів і тому такі стільникові мережі мають кращу спектральну ефективність. Основна ідея полягає в тому, щоб виконувати обробку даних в декількох точках доступу і передавати їх на один мобільний пристрій через кілька точок доступу. На такій концепції спільної обробки базуються координоване багатоточкове передача/приймання (CoMP) в LTE, координована багатоточкова передача зі спільною передачею (CoMP-JT) [1] і багатостільникові кооперативні мережі MIMO [2]. Ці методи поділяють точки доступу на розрізнені кластери і реалізуються мережево-орієнтованим способом. Це дозволяє декільком точкам доступу в кластері спільно передавати один набір даних на один мобільний пристрій, що схоже на розподілену

антенну систему. Однак ці методи не знайшли широкого застосування в системах LTE через розрив між теоретичним і практичним коефіцієнтом підсилення. Інший підхід, орієнтований на користувача, був впроваджений для спільної передачі з декількох точок доступу. При цьому, орієнтований на користувача спосіб враховує завади і передає сигнал конкретному користувачеві. В результаті, мобільний пристрій спільно обслуговується декількома точками доступу в кластері, що забезпечує зменшення рівня завад за рахунок усунення границь між стільниками [2].

Таким чином, вказана концепція використовується в кооперативній MIMO [3], кооперативних малих стільниках [4] та хмарній/централізованій мережі радіодоступу (C-RAN) [5]. Важливим аспектом при реалізації орієнтованої на користувача мережі з декількома точками доступу є синхронізація і опорні сигнали між точками доступу. При цьому, мобільний пристрій повинен знайти і вибрати найкращу стільникову мережу, отримавши синхронізацію часу і частоти, а також визначивши відповідний ідентифікатор стільника та опорні сигнали. На рис. 3 показано порівняння традиційних стільникових мереж і мереж, орієнтованих на користувача.

Мережі, орієнтовані на користувача, дозволяють користувачам безперешкодно переходити з однієї мережі в іншу. Мережі, які можуть надати користувачу найкращий сервіс, вибираються автоматично, використовуючи наявні лінії зв'язку. В основному, часті хендовери в щільних мережах можуть призвести до втрати даних, затримок хендоверу, ефекту пінг-понгу [6].

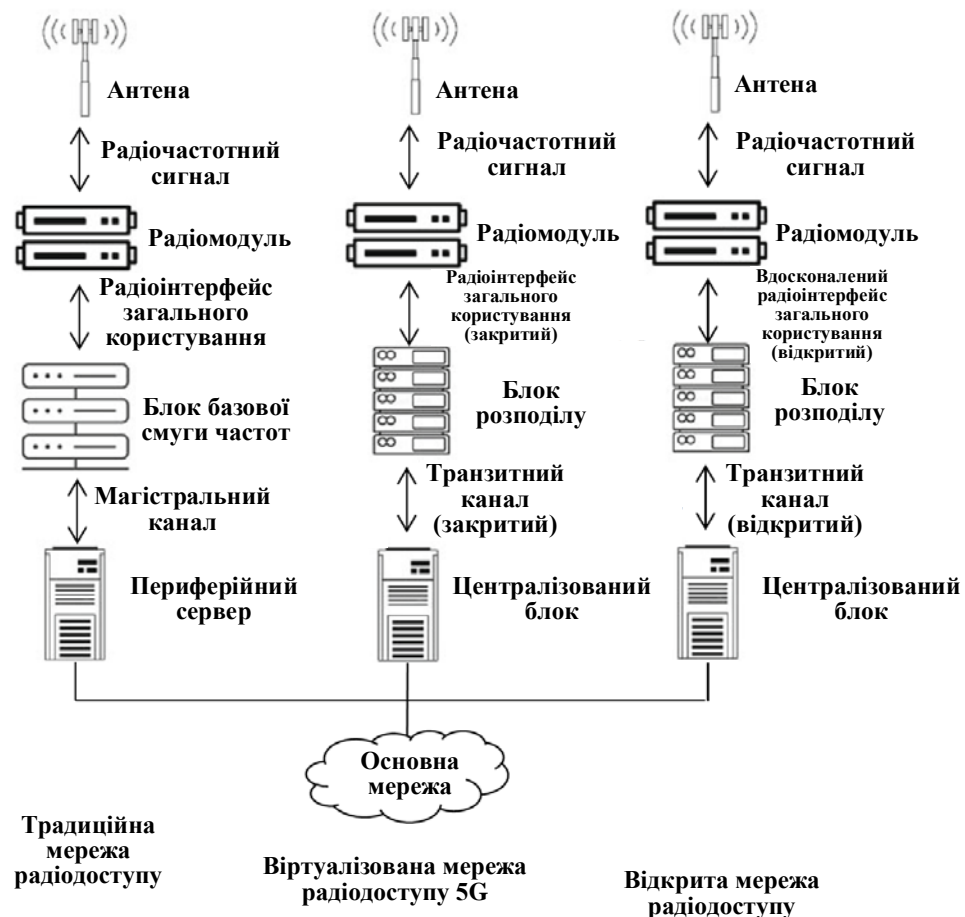


Рисунок 1.2 – Порівняння архітектури сегментів мобільних мереж RAN, 5G vRAN та Open RAN

Неземні мережі, такі як зв'язок за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), супутниковий зв'язок (Satcom) і морський зв'язок, найкраще підходять для ускладнених випадків використання, таких як арктичні райони, високі гори. У цих місцях важко впроваджувати стільникові мережі через нестабільне середовище і високу вартість розгортання мережі. Таким чином, супутниковий зв'язок є розумним рішенням для цих районів. У системах 6G розглядається використання геостаціонарних супутників (GEO), низькоорбітальних супутників (LEO) і висотних псевдосупутників (HAPS).

Крім того, взаємодія між стільниковими системами і супутниковим зв'язком розглянута в стандартах 5G. Один наземний шлюз приймає пакети даних із супутників, виконує функцію пакетного маршрутизатора з підключенням до Інтернету. Супутниковий зв'язок надає багато переваг, таких як розширена площа покриття, краща адаптивність до катастрофічних подій і

гнучкість. Таким чином, інтегровані мережі між супутниковим і стільниковим зв'язком покращають покриття на периферії стільникового зв'язку. Однак, однією з ключових проблем впровадження інтегрованої технології є взаємна інтерференція між супутниками і стільниковими мережами, оскільки міліметрові діапазони хвиль зараз використовуються в супутниковому зв'язку, а також ці діапазони були прийняті в стільникових мережах малих розмірів.

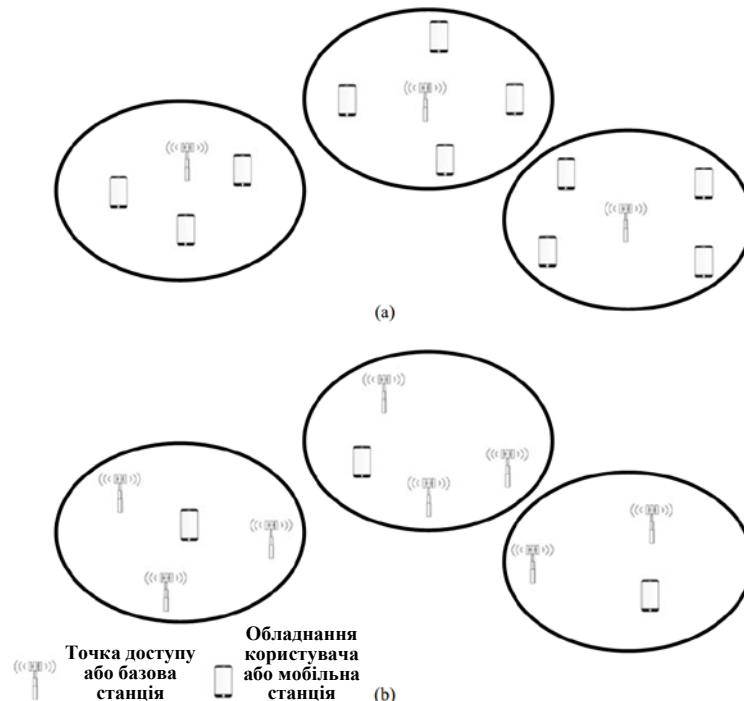


Рисунок 1.3 – Стільникові мережі (а) та мережі, орієнтовані на користувача (б)

В результаті, відбувається перекривання діапазонів частот 24 - 29 ГГц, що виділені для міліметрового діапазону в мережах 5G та Ка-діапазону (26,5 - 40 ГГц), що використовується для супутникового зв'язку. Основними варіантами інтегрального використання супутникових та стільникових мереж є: використання трафіку стільникових мереж для передачі даних, не чутливих до часу, підтримка рухомих платформ, таких як кораблі, поїзди, автомобілі, послуги Інтернету речей у сільській місцевості. Оскільки інвестування в наземні мережі може бути економічно неефективним, наприклад, "розумне" сільське господарство, "розумні" заводи та вітрові електростанції, які можуть бути розташовані в сільській місцевості, таким чином, супутникова мережа може бути доцільною для цих випадків використання. Підтримка

магістрального з'єднання за допомогою супутникового транзитного зв'язку необхідна коли базова станція 5G у сільській місцевості, високогір'ї або арктичній зоні не може підключитися до магістральної мережі 5G через нестабільне середовище або відсутність транзитного зв'язку. БПЛА може зависати на невеликій висоті і забезпечувати зв'язок на короткий час (зазвичай до 1 години) на обмеженій території. Граничні обчислення з множинним доступом (MEC) дозволяють мобільним станціям переносити свої обчислювальні завдання на границю мережі та покращувати обчислювальні можливості мереж. Канал зв'язку з використанням БПЛА, оснащеного MEC, буде корисним для додатків з низькою затримкою. Прикладами використання зв'язку за допомогою БПЛА можуть бути прямі трансляції на 360 градусів, тимчасові ретрансляційні вузли в надзвичайних ситуаціях, приватні мережі стільникового зв'язку [7]. Основним завданням БПЛА при забезпеченні зв'язку є пошук оптимального позиціонування в сценарії розгортання телекомунікаційної мережі. Використання каналів передавання БПЛА використовувати для безпроводних ретрансляторів або транзитних радіоканалів стільникових мереж забезпечує багато переваг, таких як висока мобільність і швидке розгортання. При цьому, забезпечується можливість зменшення блокування і втрат в радіотракті, а також підвищення надійності і пропускної здатності каналів передавання. Інтегрована мережа між наземними і стільниковими мережами відображає переваги мереж 6G. На рис. 4 показано приклад інтегрованих мереж між наземними і стільниковими мережами [8].

Для покращення якості радіозв'язку та оптимізації пропускної здатності каналів у системах 6G повинні бути більш ефективними ключові компоненти фізичного рівня. В стільникових системах схеми каналного кодування еволюціонували від згорткового кодування до турбокодування і LDPC. При цьому, основною метою каналного кодування в каналі для одного користувача є досягнення межі Шенона. Зокрема, турбо-кодування та LDPC забезпечують близьку до межі Шенона продуктивність використання каналів передавання. Визначено, що використання множинних каналів покращує продуктивність мереж 5G та 6G, але зумовлює ускладнення схемотехніки приймача радіосистеми. Іншим завданням дослідження каналного кодування є особливості застосування недвійкових кодів.

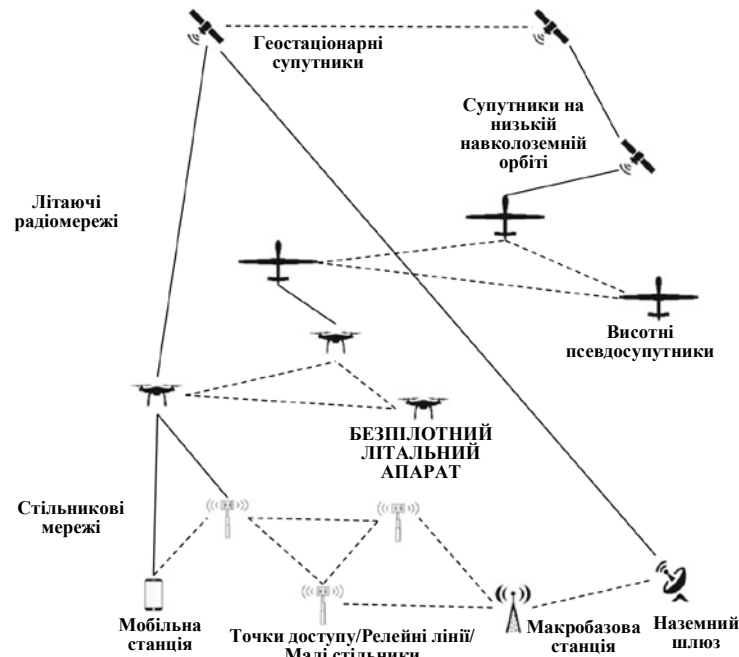


Рисунок 1.4 – Структура сегменту інтегрованої мережі 6G

Отже, використання недвійкових LDPC із турбо-кодуванням забезпечують кращу продуктивність радіосистем, але при цьому, збільшується складність у порівнянні із двійковими LDPC і турбо-кодуванням.

Ще одним завданням дослідження у галузі кодування каналів є створення надійної схеми кодування каналів з коротким кодовим словом. В результаті, підвищення продуктивності радіосистем при застосуванні турбо-кодів та кодів LDPC передбачає використання пакетів великої довжини. Ускладнене використання турбо-кодів або кодів LDPC для додатків URLLC зумовлене використанням інформаційних пакетів даних із невеликим розміром для забезпечення мінімальної затримки поширення сигналів в радіотракті. В результаті, виникає необхідність створення нової схеми кодування, яка дозволить досягти близької до межі Шенона продуктивності радіоканалу передавання при невеликій довжині кодового слова. Квадратурна амплітудна модуляція (QAM) широко використовується в стільникових системах, оскільки модуляція і демодуляція QAM характеризується спрощеною технічною реалізацією в телекомунікаційному обладнанні. Оскільки точки її сузір'я розташовані на різній відстані один від одного тому розподіл далекий від гаусівського. З іншого боку, амплітудно-фазова маніпуляція (APSK) стійка до нелінійності підсилювачів сигналів, а також більш стійка до фазового шуму у

порівнянні із іншими форматами модуляції. Таким чином, APSK модуляція використовується в мережах мовлення, супутниковому зв'язку та може бути використана в терагерцовому зв'язку систем 6G. У системах 5G розглядається багато нових форм сигналу, таких як CP-OFDM, банк фільтрів з кількома носійними (FBMC), універсальна фільтрація з кількома носійними (UFMC) та мультиплексування із узагальненим частотним розділенням (GFDM) [9].

Телекомунікаційні сигнали мають відповідати таким вимогам: висока спектральна ефективність, масштабоване розширення смуги пропускання, підтримка модуляції високого порядку, ефективна структура для MIMO. Отже, формат телекомунікаційних сигналів 6G має відповідати вимогам до сигналів 5G та можливістю забезпечення підтримки терагерцового діапазону, ускладненої схемотехніки приймачів та процесу аналогової обробки сигналів.

Технологія передавання даних (BackCom) використовує відбиті або розсіяні радіосигнали для передачі даних. При цьому, використовується пасивне відбиття та модуляція падаючого сигналу без застосування в телекомунікаційному обладнанні активних радіочастотних компонентів. Оскільки трансивери BackCom споживають дуже мало енергії в порівнянні зі звичайними трансиверами та мають спрощену архітектуру, яка підходить для забезпечення роботи пристроїв IoT, що не потребують додаткового електроживлення, можуть використовуватися в масовому підключенні 6G. Система BackCom складається з пасивного вузла, який збирає енергію із вхідного радіосигналу та приймача. Пасивний вузол складається із детектора радіочастотної енергії, акумулятора, блоку модуляції та декодера інформації. Невідповідність між опором антени та навантаженням викликає перевідбиття радіосигналу. Зміна імпедансу навантаження дозволяє керувати коефіцієнтом відбиття та змінювати випадкову послідовність, модулюючи відбитий сигнал інформацією з пасивного вузла. На рис. 5. відображено три топології системи BackCom [1].

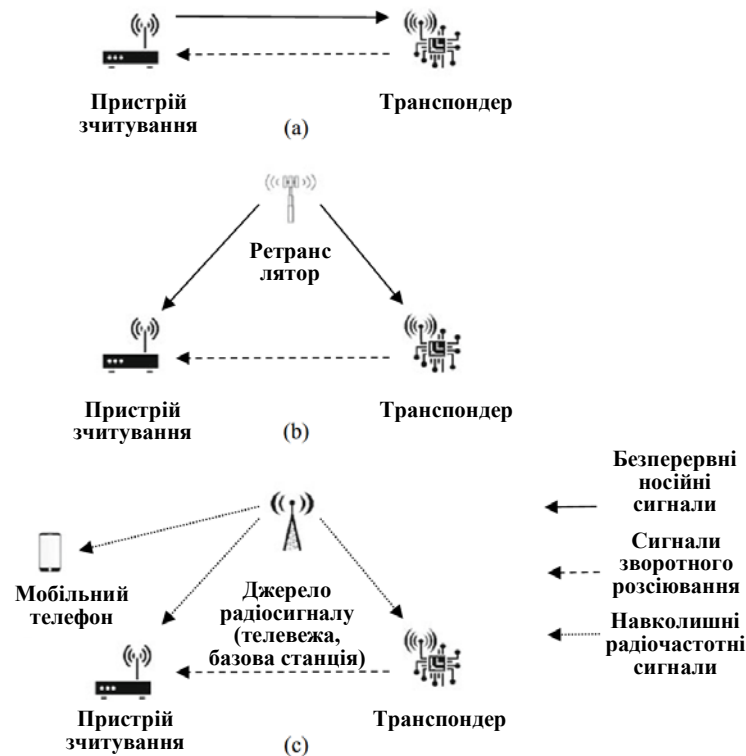


Рисунок 1.5 – Топології систем BackCom: традиційна (а); бістатична (b), (c)

На рисунку 1.5 а, при традиційній топології системи передавання трансивер генерує радіочастотні сигнали для активації пасивного радіовузла, який модулює та відображає радіочастотні сигнали для передачі даних. Втрати сигналів через збільшення відстані між пасивним вузлом та зчитувальним пристроєм створює необхідність підвищення енергії споживання та формування спрощеного формату модуляції сигналу зворотного розсіювання.

Таким чином, традиційний зв'язок із зворотним розсіюванням може використовуватися для додатків RFID малого радіусу дії. Для розширення зони покриття RFID мережі використовують додаткові ретранслятори, як показано на рис. 5 b, та 5 с, яка є узагальненою версією бістатичного зв'язку із зворотним розсіюванням. Ускладнення реалізації технології BackCom в стільниковій системі зумовлена необхідністю використання інформації про фазу та стан каналу стільникової системи. Тому, розглядається некогерентний зв'язок, який дозволяє краще використовувати ресурси і надавати послуги. У системах 6G звичайна радіочастотна ідентифікація може бути замінена технологією BackCom або обидві технології можуть співіснувати в мережах 6G. У таблиці 5 наведено порівняння традиційного зв'язку RFID та BackCom [2].

Таблиця 1.5 – Порівняння зв'язку RFID і BackCom

Назва параметру	RFID	BackCom
Довжина тракту передавання	Менше ніж 1 м	Менше ніж 1 км
Швидкість передачі даних	Менше ніж 640 Кбіт/с	Менше ніж 10 Мбіт/с
Формат модуляції	BPSK	ASK, FSK, PSK, QAM Можливість модуляції високого порядку
Топологія мережі	Точка-точка	Множинний доступ

Програмована метаповерхня - це інтерфейс, який дозволяє користувачам створювати та керувати власними робочими середовищами, використовуючи набір інструментів та можливостей, що надаються платформою. Основна концепція програмованої метаповерхні полягає у тому, що користувач може налаштувати робоче середовище згідно зі своїми потребами та вимогами, використовуючи готові компоненти, які надаються платформою.

Основні елементи програмованої метаповерхні включають в себе інтерфейс користувача, який дозволяє створювати та налаштовувати робочі середовища, та набір інструментів, які дозволяють виконувати різноманітні дії, такі як створення та редагування вмісту, організація робочих процесів та інше.

Однією з основних переваг програмованої метаповерхні є те, що користувачі можуть легко налаштувати робоче середовище згідно зі своїми потребами, що дозволяє їм бути більш продуктивними та ефективними в своїй роботі. Крім того, програмована метаповерхня надає можливість розширення функціональності за допомогою додатків та плагінів, що дозволяє користувачам розширювати можливості своїх робочих середовищ.

Програмована метаповерхня зумовлює модернізацію фундаментальної апаратної структури бездротових систем передавання, зокрема забезпечується покращення каналного середовища для бездротового зв'язку [3]. Метаповерхні на основі штучних провідних структур та двовимірних матеріалів із субхвильовими структурними схемами, які дозволяють керувати поширенням електромагнітних хвиль. Звичайні метаповерхні мають фіксовану структуру і тому не можуть маніпулювати електромагнітними хвилями. Однак, щоб використовувати їх у системах зв'язку, ми повинні динамічно їх налаштовувати

та керувати електромагнітними хвилями. Програмовані метаповерхні з реконфігурованими електромагнітними параметрами можуть регулювати фазу, амплітуду, поляризацію та орбітальний кутовий момент електромагнітних хвиль за допомогою керуючого сигналу. На рисунку 6 відображено архітектуру трансивера з використанням програмованої метаповерхні [4]. Передавач (рисунк 1.6 а) складається з блоків кодування та модуляції, сигналу керування та програмованої метаповерхні.

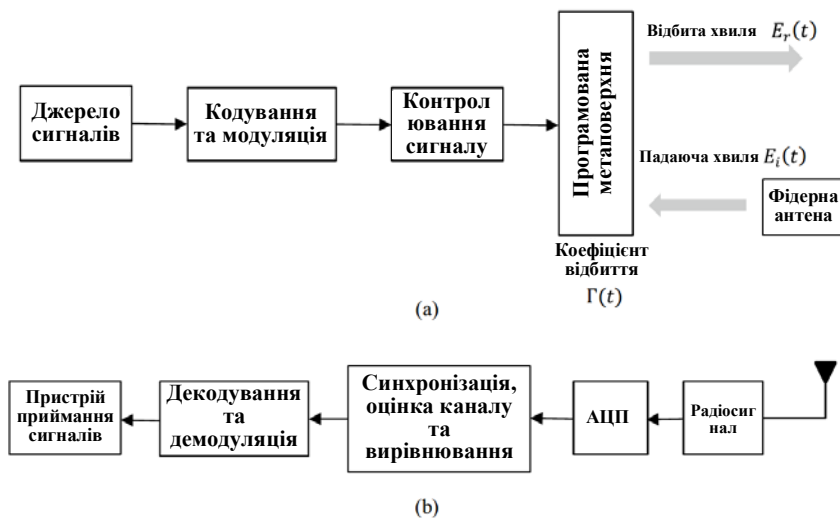


Рисунок 1.6 – Схема передавача (а) та приймача (б) з використанням програмованої метаповерхні

Основною концепцією програмованої метаповерхні в бездротовому зв'язку є керування коефіцієнтом відбиття в термінах модульованих або вихідних даних для створення гнучкого та налаштовуваного середовища для бездротового зв'язку. Це забезпечує можливість налаштування та управління різними аспектами бездротового зв'язку, такими як швидкість передачі даних, зони покриття, способи передачі сигналу та інші.

Однією з ключових особливостей програмованої метаповерхні в бездротовому зв'язку є підтримка різних бездротових протоколів та стандартів. Це дозволяє користувачам використовувати різні пристрої та технології зв'язку та налаштовувати їх відповідно до вимог та потреб. Крім того, програмована метаповерхня в бездротовому зв'язку дозволяє користувачам контролювати інтерференцію та шум у мережі, що забезпечує більш надійну та стабільну

роботу бездротової мережі. Вона також дозволяє автоматично визначати та коригувати проблеми зв'язку, що дозволяє забезпечувати високу якість зв'язку та уникнути можливих перерв у роботі мережі. Крім того, програмована метаповерхня в бездротовому зв'язку дозволяє використовувати аналітичні інструменти та машинне навчання для аналізу та передбачення проблем у мережі. Це дозволяє забезпечувати більш ефективне управління мережею та забезпечувати більш високу якість зв'язку. Коефіцієнт відбиття визначається як відношення комплексної амплітуди відбитої хвилі до амплітуди падаючої хвилі [5].

Звичайний приймач на рисунку 1.6 b складається із блоків синхронізації, оцінювання каналу, вирівнювання, демодуляції та декодування каналу.

Очікується, що в системах 6G вдосконалені методи розподілу спектра покращать використання ресурсів та гнучкість робочого діапазону частот, враховуючи неліцензовані піддіапазони. Таким чином, за допомогою методів спільного використання робочого спектру можливо організувати його спільне використання багатьма операторами, сторонніми операторами або місцевими операторами. Агрегація носійних в технології LAA (Licensed Assisted Access) забезпечує підвищення швидкості передачі даних у мобільних мережах за допомогою комбінування різних частотних діапазонів для передачі даних, забезпечуючи високу швидкість передачі та більш ефективне використання доступного спектру.

Отже, LAA технологія дозволяє використовувати неліцензований смугу частот (наприклад, 5 ГГц) в комбінації з ліцензованими діапазонами (наприклад, LTE на 2,6 ГГц). Таким чином, збільшується загальна пропускна здатність мережі та покращується якість обслуговування користувачів.

Важливою технологічною перевагою мобільних мереж 4G та 5G у порівнянні з попередніми поколіннями мобільних технологій є агрегація носійних сигналів. Дисбаланс між спектрами висхідного і низхідного зв'язку може бути однією з причин дефіциту спектру, він не завжди є таким і не є єдиним фактором, який призводить до дефіциту коли багато компаній і організацій борються за доступ до тих самих діапазонів радіочастот. У такій ситуації може виникнути дисбаланс між спектрами висхідного і низхідного зв'язку, оскільки різні оператори мобільного зв'язку можуть користуватися різними діапазонами радіочастот для передачі і отримання даних. Це може

призвести до того, що попит на один діапазон радіочастот перевищує його доступну кількість, тоді як інші діапазони можуть залишатися недостатньо використаними.

Дисбаланс призводить до низького рівня використання стільникових систем. Технології спільного використання спектру та удосконалені дуплексні системи вирішують проблеми дисбалансу. Методи повного дуплексування в системах 5G дозволяють мобільним операторам розподіляти гнучкий спектр та підвищувати коефіцієнт використання спектру носійних частот. Однак вони не були прийняті в системах 5G через недостатню кількість теоретичних і експериментальних результатів. Замість цього в системах 5G було прийнято використання функції гнучкого спектру, наприклад, метод TDD передачі даних в бездротових мережах, де передача та прийом даних відбуваються в різні часові інтервали на одному і тому ж каналі зв'язку.

У TDD системах передача даних поділяється на часові слоти, які можуть бути використані для передачі даних в один час або для прийому даних в інший час. Це означає, що у той час, коли один пристрій передає дані, інший пристрій може приймати дані, і навпаки. Технологія TDD дозволяє ефективно використовувати канал зв'язку, оскільки часові слоти можуть бути присвоєні тільки тим пристроям, які в даний момент використовують канал зв'язку. Це дозволяє зменшити колізії та перенавантаження мережі та підвищити швидкість передачі даних. Технологія TDD часто використовується в мережах зв'язку, таких як мобільні телефонії, Wi-Fi, Bluetooth та інші бездротові мережі. У порівнянні з дуплексом з частковим розділенням (Half Duplex), де пристрій може передавати або приймати дані, але не може робити ці обидві речі одночасно, TDD дозволяє збільшити пропускну здатність каналу зв'язку та покращити ефективність передачі даних. Залежно від варіантів використання або конфігурації використання спектру можна налаштувати робочі спектри висхідного та низхідного каналу передавання. У мережах 6G передбачається більш гнучкий розподіл спектру шляхом спільного використання не лише спектру, але й часу та інших мережевих ресурсів.

$$E_r(t) = E_i(t) \Gamma(t), \quad (1.1)$$

де $E_r(t)$, $E_i(t)$, $\Gamma(t)$ – відбита хвиля, падаюча хвиля та коефіцієнт відбиття відповідно. За коефіцієнтом відбиття можна побудувати модуляцію бездротової системи. Інформаційні дані кодуються, а потім модулюються. Можна вибрати декілька типів канального кодування та схем модуляції. Вони відображаються в сигналі керування коефіцієнтом відбиття. Наприклад, якщо розглянути модуляцію QPSK, коефіцієнт відбиття можна виразити таким чином:

$$\Gamma(t) = \sum_{n=1}^N P_n h(t - nT) \quad (1.2)$$

де P_n [P_1, P_2, P_3, P_4] є комплексним коефіцієнтом відбиття на n -му символі та може мати чотири різні коефіцієнти відбиття. T позначає тривалість символу. $h(t)$ — функція вибірки. Як ми бачимо на рис. 1.6b, можна використовувати звичайний приймач. Він включає в себе синхронізацію, оцінку каналу, вирівнювання, демодуляцію та декодування каналу.

Системи 5G передбачають віртуалізацію мережі. Це означає, що фізичні компоненти мережі будуть замінені на програмні еквіваленти, що дає змогу збільшити ефективність мережі та знизити вартість її розгортання та підтримки. Віртуалізація мережі дозволяє зменшити час, необхідний для розгортання нових послуг та функцій мережі, забезпечуючи більш гнучкий та швидкий розвиток мережі. Крім того, це дозволяє більш ефективно використовувати ресурси мережі та зменшити витрати на її розгортання та підтримку.

Віртуалізація мережі є важливою складовою 5G, оскільки нова мережа потребує більшої гнучкості та ефективності, щоб забезпечити високу якість послуг та підтримку масштабування мережі в майбутньому. Цей новий підхід до проектування дозволяє нам відокремити програмне забезпечення від апаратного забезпечення та передавати мережевий компонент до периферійних мереж або інших мереж, коли користувачеві потрібна певна функція. Завдяки такій віртуалізації мобільні оператори можуть отримати багато переваг, таких як зменшення капітальних витрат (CAPEX) та операційних витрат (OPEX), скорочення часу на розгортання мережевої послуги та покращення масштабованості мережі. Такий підхід корисний для оптимізації розподілу мережевих ресурсів. На цій віртуалізації мережі базується мережеве розшарування (Network Slicing) в системах 5G, яке дозволяє створювати

віртуальні мережеві середовища з різними характеристиками для різного використання мережі, зокрема мобільний Інтернет, медичні послуги, автомобільна транспортна система [6].

Кожен з цих віртуальних сегментів (slice) мережі може мати свої власні характеристики, такі як пропускна здатність, затримка, надійність та безпека, та буде налаштований для відповідних телекомунікаційних засобів мережі. Такі віртуальні сегменти можуть бути створені та настроєні автоматично за допомогою програмного забезпечення мережі. Network Slicing дозволяє мережі 5G забезпечувати розширений спектр послуг та підтримувати збільшену кількість підключених пристроїв з різними потребами в реальному часі. Це може бути корисно для різних промислових та бізнес-застосунків, таких як медицина, автотранспорт, виробництво, дистанційна робота [6]. Зокрема, створення віртуальних наскрізних мереж, пристосованих до різних додатків 5G, таких як eMBB, URLLC і mMTC дозволить системам 5G бути більш масштабованими і швидше адаптуватися до нових послуг. Розподіл мережі на сегменти став однією з ключових функцій системи 5G. З метою підтримки швидкого оновлення мережевого обладнання та пристроїв кінцевих користувачів, в системах 6G продовжено впровадження архітектури, що розділяє програмне та апаратне забезпечення. З точки зору автономної модернізації, сучасні телекомунікаційні пристрої завдяки технологіям автоматичного визначення параметрів апаратного забезпечення (Hardware Profiling) та автоматичного визначення оптимального програмного забезпечення (Software Selection) можуть оцінювати можливості апаратного забезпечення та використовувати ефективно програмне забезпечення для оптимальної працездатності.

Автоматичне визначення параметрів апаратного забезпечення дозволяє пристрою отримувати інформацію про функціональні характеристики процесора, пам'яті, диска та інших компонентів пристрою. Така інформація може бути використана для вибору оптимальних налаштувань програмного забезпечення, яке використовується на телекомунікаційній пристрої. Автоматичний вибір оптимального програмного забезпечення дозволяє телекомунікаційному пристрою забезпечувати оптимальну працездатність та більш ефективно використовувати ресурси. Програмне забезпечення може бути підібране на основі параметрів апаратного забезпечення та вимог до

виконуваних задач, що дозволяє досягти максимальної продуктивності та ефективності роботи телекомунікаційного пристрою. Отже, автономне адаптування телекомунікаційних пристроїв за допомогою автоматичного визначення параметрів апаратного забезпечення та автоматичного визначення оптимального програмного забезпечення є важливою складовою забезпечення ефективності та продуктивності телекомунікаційних пристроїв в сучасних інфокомунікаційних мережах. Оскільки, традиційно апаратне і програмне забезпечення є спільним для телекомунікаційних пристроїв та систем, тому неможливо окремо модернізувати їхні функції та можливості, такі як кількість антен, роздільну здатність АЦП і схеми кодування з корекцією помилок.

Технологія програмно-конфігурованого радіо (SDR) відповідає підходу автономного адаптування телекомунікаційних пристроїв. Основна ідея SDR полягає у тому, що програмне забезпечення може контролювати технічні параметри радіообладнання, такі як частота, ширина смуги та модуляція, що дозволяє адаптувати роботу радіо до змінних умов оточення, таких як інтерференція, забруднення частотного спектра та зміна топології мережі. Це дає можливість пристосовувати телекомунікаційні пристрої до потреб користувачів і покращувати ефективність мережі, знижуючи при цьому витрати на обслуговування та управління мережею.. Однак у минулому SDR технологія не була настільки ефективною, як було бажано, оскільки обчислювальна потужність комп'ютерів була обмеженою, що зробило досить важкою реалізацію програмно-керованої радіосистеми, яка вимагала великої кількості обчислювальних ресурсів. Крім того, ранні версії програмного забезпечення для SDR часто мали обмежену функціональність та не забезпечували достатньої ефективності.

Однак з плином часу технологія SDR стала все більш ефективною, особливо з появою нових технологій, таких як FPGA та DSP, які забезпечують високу обчислювальну потужність та можливості для програмного забезпечення. Також стандарти радіо- та мережевих протоколів, такі як LTE та 5G, постійно вдосконалюються для підтримки SDR технологій та забезпечення їх сумісності з іншими радіообладнанням. Отже, хоча SDR технологія може не бути настільки поширеною, як було бажано, вона все ж може бути дуже ефективною та має потенціал для дальшого розвитку. Нещодавній розвиток NBIC та технологій антенних систем дозволив покращити апаратні можливості

та забезпечити гнучку адаптацію до швидкої модернізації апаратної частини телекомунікаційної системи. Крім того, алгоритми ШІ (штучного інтелекту) та МН (машинного навчання) можуть бути корисними для оптимальної настройки алгоритмів приймача на апаратній платформі та для побудови інтелектуального фізичного рівня.

2 БЕЗПРОВІДНІ МЕРЕЖІ 6G ІЗ ПІДТРИМКОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

2.1 Особливості застосування штучного інтелекту та машинного навчання у фізичні рівні мережі

ШІ може бути використаний для вирішення завдань автоматичної настройки та оптимізації параметрів алгоритмів приймача. Наприклад, використання алгоритмів генетичного алгоритму або інших алгоритмів оптимізації може допомогти знайти найбільш оптимальні значення параметрів алгоритмів приймача для певної задачі. МН може бути використаний для навчання приймача розпізнавати різні сигнали та шуми. Наприклад, можна використовувати навчальні набори даних для навчання нейронної мережі розпізнавати різні типи сигналів та шумів та приймати рішення про оптимальні налаштування алгоритмів приймача на основі цієї інформації. У цілому, використання алгоритмів ШІ та МН може допомогти зробити алгоритми приймача більш ефективними та оптимальними на певній апаратній платформі та забезпечити побудову інтелектуального фізичного рівня, який може адаптуватися до різних умов роботи. Традиційний стільниковий зв'язок і мережі зазвичай розробляються і розгортаються із заздалегідь визначеною конфігурацією систем, що вимагає ітеративного методу проб і помилок для кожного сценарію. У традиційних системах стільникового зв'язку перед встановленням зв'язку необхідно виконати процес розгортання мережі, що може займати значний час і коштувати значні кошти. Крім того, підтримка мережі вимагає зміни конфігурації та налаштування обладнання відповідно до потреб користувачів та різних сценаріїв використання. Тому для традиційних систем зазвичай потрібен ітеративний метод проб і помилок для кожного сценарію. Цей процес може включати в себе встановлення різних параметрів мережі та обладнання, перевірку та налаштування різних протоколів зв'язку та рішень щодо управління ресурсами.

Однак, з появою технологій програмно-конфігурованого радіо (SDR) та використання програмного забезпечення для управління мережами (SDN), з'являються нові можливості для автоматизації процесу розгортання та управління мережами. Такі системи можуть бути здатні до автоматичного визначення оптимальної конфігурації мережі та налаштування її параметрів для

різних сценаріїв використання. Це дозволяє значно знизити час та витрати на розгортання та підтримку мережі. Системи 6G передбачають більш складні та різноманітні сценарії зв'язку та мережі, що потребують розвитку нових технологій та підходів. Наприклад, системи 6G повинні забезпечувати стабільний зв'язок в умовах високих швидкостей руху автомобілів, роботів-помічників та інших автоматизованих пристроїв. Крім того, системи 6G повинні підтримувати високу рівень безпеки та конфіденційності для захисту персональних даних користувачів у медичних та інших чутливих сферах. Для цього системи 6G повинні використовувати нові технології, такі як обробка даних на основі штучного інтелекту та блокчейн-технології, щоб забезпечити високий рівень надійності та безпеки мережі. Традиційний підхід може не працювати належним чином для підтримки численних вимог 6G. Таким чином, системи 5G NR містять багато нових функцій, таких як розбиття мережі на сегменти для гнучкої підтримки декількох послуг і масштабування для функціональних додатків. Зокрема, це дозволить покращити проектування та оптимізацію систем 6G. Оптимізація систем бездротового зв'язку та мереж в основному пов'язана з багатьма параметрами, такими як складність, вартість, енергія, затримка, пропускна здатність [7].

Алгоритми штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) можуть бути застосовані для вирішення оптимізаційних задач в мережах 6G та сприяти підвищенню продуктивності. Алгоритми ШІ та МН можуть бути використані для оптимізації різноманітних аспектів мережі 6G, включаючи розподіл пропускної здатності, керування відстанню та маршрутизацію. Вони можуть допомогти зменшити час затримки та підвищити швидкість передачі даних в мережах 6G. Крім того, ШІ та МН можуть бути використані для автоматизації керування мережею, що може допомогти зменшити витрати на управління мережею та забезпечити більш ефективне використання ресурсів мережі. Наприклад, алгоритми глибинного навчання можуть бути використані для оптимізації керування каналами зв'язку та розподілу пропускної здатності. Алгоритми підсиленого навчання можуть бути використані для оптимізації маршрутизації, що може знизити час затримки та забезпечити більш ефективне використання ресурсів мережі [8].

Отже, застосування ШІ та МН може підвищити продуктивність мереж 6G, забезпечуючи більш ефективне використання ресурсів та підвищуючи

якість обслуговування. Також, алгоритми ШІ та МН корисні для класифікації, кластеризації, регресії, зменшення розмірності та прийняття рішень. Багато компонентів систем 6G тісно пов'язані з ними. Наприклад, проблема розподілу ресурсів і планування є різновидом проблеми класифікації і кластеризації. Оцінювання каналів - це проблема регресії. Декодування Вітербі базується на динамічному програмуванні. Керування мережевим трафіком тісно пов'язане з проблемою прийняття послідовних рішень. Таким чином, алгоритми ШІ та МН стануть ключовими інструментами впровадження мереж 6G.

У стільникових мережах фізичний рівень відповідає за передачу сигналу між станцією базової мережі та мобільними телефонами або іншими пристроями зв'язку. Основною метою фізичного рівня є досягнення надійної передачі даних по бездротовому каналу. Для цього використовуються різні технології модуляції та кодування, щоб зменшити вплив шуму та спотворень сигналу. Крім того, важливо правильно розподіляти доступні ресурси, такі як пропускна здатність та частотні канали, між користувачами, щоб забезпечити ефективну передачу даних та уникнути перевантаження мережі. До інших завдань фізичного рівня в стільникових мережах можна віднести забезпечення стійкості передачі даних при зміні умов каналу, таких як зміна відстані між пристроями або зміна середовища передачі, а також забезпечення конфіденційності та безпеки передачі даних. У цілому, фізичний рівень відіграє важливу роль у забезпеченні надійного та ефективного зв'язку в стільникових мережах.

Передавач у бездротовій комунікації включає в себе обробку базової смуги частот та обробку радіочастот. Обробка базової смуги частот включає такі процеси, як кодування каналу, модуляція, OFDM (ортогональна частотна модуляція) та MIMO (множинний вхід-множинний вихід). Кодування каналу використовується для забезпечення надійної передачі даних через бездротовий канал, де дані кодуються за допомогою спеціальних кодів, які дозволяють виявити та виправити помилки під час передачі. Модуляція використовується для передачі даних за допомогою радіохвиль, де дані кодуються в частотному або фазовому зміщенні сигналу. OFDM та MIMO використовуються для підвищення пропускної здатності каналу та зменшення впливу шуму та спотворень сигналу [9]. Обробка радіочастот включає такі елементи, як малошумний підсилювач (LNA), змішувач та підсилювач потужності (PA).

LNA використовується для підсилення слабкого радіосигналу, що отримується від приймача. Змішувач використовується для змішування радіосигналу зі змінною частотою з іншим сигналом, що генерується власним генератором частоти. PA використовується для підсилення сигналу та передачі його через антену в бездротовий канал. Усі елементи передавача допомагають забезпечити ефективну та надійну передачу даних в бездротовій комунікації. Приймач у бездротовій комунікації відновлює вихідні дані з отриманих даних, включаючи погіршення каналу, такі як шум, завмирання та перешкоди. Приймач включає в себе декодер каналу, який використовується для відновлення оригінального сигналу зі спотворених даних, що отримуються від передавача. Декодер каналу використовує різноманітні алгоритми, такі як декодування, демодуляція та демапування, щоб відновити оригінальний сигнал зі спотворених даних. При цьому, алгоритми ШІ та МН можуть відігравати важливу роль в оптимізації фізичного рівня телекомунікаційних мереж. Зокрема, алгоритми ШІ можуть бути використані для аналізу трафіку в мережі, що дозволяє здійснювати більш ефективний контроль ресурсів мережі. Наприклад, алгоритми ШІ можуть використовуватися для автоматичного виявлення збоїв в мережі та прогнозування навантаження на мережу, що дозволяє операторам мережі вчасно реагувати на проблеми та зменшувати час відновлення послуг для користувачів. МН може бути використаний для автоматичної оптимізації параметрів мережі, таких як потужність передачі сигналу та розташування антен, що дозволяє покращити якість зв'язку та знизити енергоспоживання мережі. Наприклад, МН може використовуватися для визначення оптимального розташування антен на вежах, що забезпечить краще покриття території та зменшить кількість блокованих дзвінків [1]. Таким чином, використання алгоритмів ШІ та МН може допомогти операторам телекомунікаційних мереж покращити якість та надійність послуг для користувачів, зменшити час відновлення послуг у разі збоїв та знизити енергоспоживання мережі. Отже, подолання завад є важливим аспектом проектування фізичного рівня телекомунікаційних систем. Завади, такі як шум каналу, завмирання, завади, дисбаланс IQ, фазовий шум, тепловий шум і спотворення радіочастотних пристроїв, можуть значно впливати на якість зв'язку та спричиняти перерви в передачі даних.

Для подолання шумів та завад використовуються різноманітні техніки,

такі як кодування, модуляція, декодування, корекція помилок та фільтрація. Кодування дозволяє збільшити стійкість до помилок, що зменшує вплив шумів та завад на передачу даних. Модуляція дозволяє ефективніше використовувати доступну пропускну здатність каналу, що дозволяє забезпечити кращу якість зв'язку. Декодування дозволяє відновити передану інформацію від корисного сигналу, який було змодульовано, що зменшує вплив завад. Корекція помилок дозволяє виявляти та виправляти помилки в переданій інформації. Фільтрація дозволяє зменшити вплив шумів та завад на передачу даних шляхом зниження рівня шумів та завад на приймачі.

Таким чином, для подолання шумів та завад в проектуванні фізичного рівня телекомунікаційних систем використовуються різноманітні техніки та методи, які дозволяють забезпечити кращу якість зв'язку та підвищити надійність передачі даних. Знаходження оптимального дизайну у блокчейні фізичного рівня може бути складним завданням, оскільки блокчейн-технології мають свої особливості та вимоги, які можуть суперечити вимогам фізичного рівня телекомунікаційних систем. Наприклад, основною характеристикою блокчейну є розподілена база даних, яка зберігається на вузлах мережі. Це може вимагати використання більш складних мережевих топологій та протоколів, щоб забезпечити безпеку та стійкість мережі. Також, обчислювальна потужність, необхідна для забезпечення роботи блокчейну, може бути дуже високою, що може вимагати використання потужних пристроїв, які можуть вплинути на витрати енергії та вартість. Однак, деякі дослідження показують, що блокчейн-технології можуть мати потенційний вплив на фізичний рівень телекомунікаційних систем, зокрема, на забезпечення безпеки та стійкості мережі, розподілене керування ресурсами та управліннями споживання енергії [2]. Отже, знайти оптимальний дизайн у блокчейні фізичного рівня може бути викликом, але застосування блокчейн-технологій може мати потенційну користь для телекомунікаційних систем. Таким чином, алгоритми ШІ та МН можуть допомогти у пошуку оптимального спільного дизайну між апаратним та програмним забезпеченням. Ці алгоритми можуть використовуватися для аналізу різних конфігурацій апаратного та програмного забезпечення та для пошуку найкращих параметрів, що можуть дати оптимальні результати в різних умовах використання.

Одна з ключових переваг алгоритмів ШІ та МН полягає в їх можливості

самооптимізації та самонавчання. Алгоритми можуть адаптуватися до нових умов, аналізувати дані про використання системи та змінювати параметри для досягнення кращих результатів. Це може допомогти забезпечити оптимальну продуктивність та ефективність системи та підвищити якість обслуговування користувачів. Застосування алгоритмів ШІ та МН також може допомогти знизити ризик помилок, пов'язаних з ручним конфігуруванням системи. ШІ можуть виявляти та коригувати помилки в реальному часі, що дозволяє зменшити час та витрати на усунення проблем. Отже, алгоритми ШІ та МН можуть мати значний вплив на оптимізацію фізичного рівня телекомунікаційних мереж, дозволяючи знайти оптимальний спільний дизайн та використовувати нові можливості, такі як самооптимізація та самонавчання. Зокрема, інтелектуальне радіо поєднує алгоритми ШІ та МН, обробку сигналів, теорію зв'язку та технології бездротових мереж. Головна ідея інтелектуального радіо полягає в тому, щоб забезпечити оптимальне використання бездротового спектру шляхом адаптації радіоприймачів та передавачів до змінних умов передачі даних.

У традиційних бездротових мережах канали розділяються на підканалі, і кожен підканал виділяється для визначеного типу даних. Однак у великих мережах, де багато користувачів і використовується багато типів даних, це може призвести до неефективного використання спектру. Інтелектуальне радіо може вирішити цю проблему, використовуючи алгоритми ШІ та МН для виявлення вільних підканалів та автоматичного вибору оптимального підканалу для передачі даних. Інтелектуальне радіо також може забезпечити більш ефективне використання спектру шляхом аналізу даних про використання спектру та адаптації до змінних умов. Наприклад, при виявленні завад в спектрі, інтелектуальне радіо може автоматично вибрати оптимальний канал та використовувати ШІ та МН для підтримки якості сигналу [3]. Отже, інтелектуальне радіо є важливою галуззю досліджень, яка поєднує алгоритми ШІ та МН, обробку сигналів, теорію зв'язку та НВІС-технології. На рис. 7 показано порівняння традиційних компонентів фізичного рівня на основі OFDM, компонентів фізичного рівня, що включають МН та обробки фізичного рівня на основі МН.

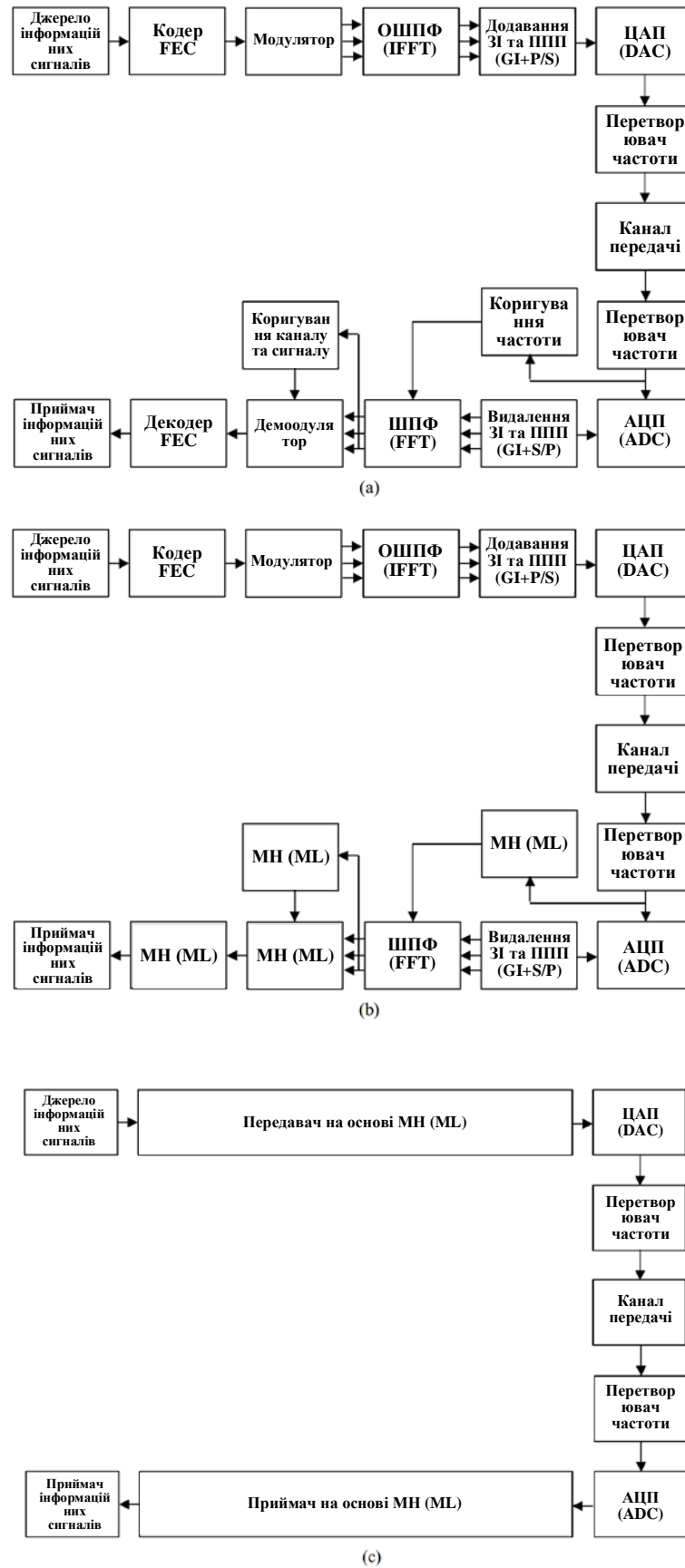


Рисунок 2.1 — Блоки фізичного рівня на основі OFDM (а), блоки фізичного рівня з алгоритмом МН в приймачі та обробка на основі МН на фізичному рівні (с)

Як видно з рисунку 2.1, на першому етапі алгоритми МН можуть вносити свій вклад у блокчейн трансивера, які використовуються у фізичному рівні телекомунікаційних мереж. Блокчейн трансивер - це пристрій, який може обмінюватися даними з іншими пристроями через мережу блокчейн. Алгоритми МН можуть допомогти покращити ефективність роботи блокчейн трансивера, забезпечивши оптимальне управління сигналами та зменшення шуму. Крім того, алгоритми МН можуть допомогти вирішувати проблеми взаємодії між різними мережами та пристроями, забезпечивши надійну і безпечну передачу даних через мережу блокчейн.

Одним з прикладів використання алгоритмів МН у блокчейн трансиверах є система автоматичної настройки радіочастотних пристроїв, яка дозволяє забезпечувати стабільну роботу пристроїв у різних умовах мережі та довкілля. Це може бути особливо корисно в ситуаціях, коли мережа має низьку якість сигналу або коли пристрої розташовані в умовах шуму та інтерференції. Наскрізний автокодер для фізичного рівня є одним з підходів до обробки фізичного рівня на основі МН. Наскрізний автокодер - це глибинна нейронна мережа, яка може використовуватися для автоматичного вивчення репрезентацій об'єктів, що забезпечують взаємозв'язок між вхідними та вихідними даними.

В контексті обробки фізичного рівня, наскрізний автокодер може використовуватися для знаходження репрезентацій сигналів з різних фізичних датчиків, які підключені до МН. Наприклад, у випадку сенсорної мережі, яка складається з декількох різних типів датчиків, таких як камери, мікрофони, акселерометри, тощо, наскрізний автокодер може допомогти зіставити дані з цих датчиків та побудувати комплексну репрезентацію вхідного сигналу, що може бути використана для подальшого аналізу і прийняття рішень. Перевагою наскрізного автокодера є те, що він може навчитися корисні репрезентації без необхідності вручну вибирати ознаки та характеристики даних. Крім того, наскрізний автокодер може бути здатний до виявлення аномалій та відновлення пошкоджених даних, що є корисною властивістю в деяких сценаріях. Однак, наскрізний автокодер може вимагати значну кількість обчислювальних ресурсів та даних для тренування, що може бути обмежуючим фактором в деяких застосуваннях [4].

Виявлення сигналів і оцінка каналів є важливими компонентами багатьох систем зв'язку та сенсорної мережі. ШІ і МН можуть покращити ці компоненти за допомогою різних методів та технік. Наприклад, у випадку систем зв'язку, ШІ можуть використовуватися для виявлення та розрізнення сигналів, які надходять через різні канали зв'язку, такі як різні антени, а також для покращення якості прийому та передачі сигналу. ШІ можуть використовуватися для зменшення шуму та спотворень, що можуть виникнути в процесі передачі сигналу через канали зв'язку. ШІ також можуть бути використані для покращення відстеження траєкторії та орієнтації об'єктів, що переміщуються, таких як мобільні телефони або дрони. У випадку сенсорної мережі, МН може допомогти виявити сигнали з різних датчиків та обробити їх, щоб отримати більш точні та зрозумілі дані про довкілля. МН може використовуватися для знаходження та ідентифікації різних типів об'єктів та сигналів, таких як звуки, зображення, температура, відстань, тиск тощо. МН може також використовуватися для оцінки каналів зв'язку та зменшення шуму та спотворень у даних, що надходять від різних датчиків. Отже, ШІ і МН можуть покращити виявлення сигналів та оцінку каналів, що може призвести до поліпшення якості зв'язку та більш точної та надійної обробки даних у сенсорних мережах. [5]. Також, глибоке навчання може покращити ефективність виявлення сигналів на фізичному рівні. Тому, глибоке навчання може бути використано для вирівнювання з нелінійними спотвореннями символів в переданих сигналах. Це можливо завдяки здатності глибоких нейронних мереж здійснювати нелінійні перетворення вхідних даних.

При зіставленні отриманого сигналу з переданим без класичного порогу виявлення, глибокі нейронні мережі можуть використовуватися для навчання моделі, яка може відновлювати переданий сигнал з нелінійними спотвореннями, враховуючи характеристики каналу зв'язку та шуму. Така модель може бути навчена на великій кількості прикладів переданих сигналів з відомими нелінійними спотвореннями та відповідними чистими сигналами. Після навчання, модель може бути застосована для відновлення чистого сигналу з отриманого сигналу з нелінійними спотвореннями. Таким чином, застосування глибокого навчання може забезпечити більш точне відновлення переданих сигналів з нелінійними спотвореннями без необхідності використання класичних порогів виявлення, що може покращити якість зв'язку

та зменшити вплив шумів на передачу даних. Такий підхід забезпечує кращу продуктивність, ніж класичне виявлення MMSE [6].

2.2 Особливості застосування штучного інтелекту та машинного навчання на каналному рівні мережі

У сучасних бездротових комунікаціях важливо отримувати точну інформацію про стан каналу (CSI), оскільки CSI безпосередньо пов'язана з продуктивністю MIMO та інших систем. Оцінювання каналу за допомогою пілотів вимагає використання деякої кількості пілотних символів для оцінки каналу зв'язку. Зазвичай, більша кількість пілотних символів дозволяє отримати більш точну оцінку каналу. Однак, довгі послідовності пілотів можуть знизити спектральну ефективність, що означає, що частотний діапазон, доступний для передачі даних, буде меншим. Отже, важливим завданням є знаходження оптимальної довжини та конструкції пілотної послідовності, що дозволяє отримати достатньо точну оцінку каналу, але при цьому не знижує спектральну ефективність. Це може бути досягнуто за допомогою оптимального розташування пілотів у часово-частотному просторі та використання складніших методів інтерполяції та екстраполяції для оцінки каналу між пілотними символами [7]. Для досягнення цієї мети можуть бути використані різноманітні методи оптимізації та машинного навчання, такі як еволюційні алгоритми, нейронні мережі тощо, що можуть знайти оптимальні пілотні послідовності та методи їхньої обробки. Крім того, процес оцінювання каналу наосліп, який використовує статистичні методи, не вимагає використання пілотних символів для оцінки каналу. Він базується на статистичних властивостях отриманих сигналів та моделюванні каналу зв'язку. Проте, для отримання точної оцінки каналу наосліп, потрібні високоточні методи статистичного аналізу та моделювання каналу, що можуть бути досить складними та витратними з точки зору обчислювальних ресурсів. Також, оцінка каналу наосліп може бути менш ефективною в умовах шуму та інших спотворень сигналу, тому що статистичні методи можуть виявитися недостатньо точними в цих умовах [8]. Таким чином, вибір методу оцінки каналу залежить від конкретних умов передачі даних та вимог щодо точності оцінки каналу. Іноді використання пілотних символів може бути

ефективнішим, особливо якщо точність оцінки каналу є критичною. А іноді можуть бути використані методи оцінки каналу наосліп для зменшення кількості пілотних символів та покращення спектральної ефективності. Методи ML можуть сприяти вирішенню цих дослідницьких завдань. Рекурентна нейронна мережа (RNN) може бути корисною для оцінки каналу наосліп в системах 6G, особливо якщо ми маємо справу зі складними динамічними змінами в каналі. RNN здатна зберігати попередні стани, що дозволяє їй моделювати залежності в часі між сигналами і використовувати ці знання для передбачення майбутніх значень. В контексті оцінки каналу наосліп RNN може використовуватися для прогнозування властивостей каналу на основі отриманих даних, що дозволить уникнути необхідності використовувати пілотні символи. Крім того, RNN може бути корисна для оцінки каналу на основі ШІ, оскільки вона може аналізувати складні динамічні зміни в каналі та передбачати їх вплив на сигнал [9].

Канальний рівень складається з двох ключових підрівнів: управління доступом до середовища (MAC) і управління логічним з'єднанням (LLC). Канальний рівень відповідає за доступ до середовища передачі даних, виявлення помилок і мультиплексування потоків даних, а також забезпечує надійне з'єднання. Основне призначення мережевого рівня полягає у з'єднанні різних мереж, визначенні найкращих маршрутів для передачі пакетів даних та управлінні мережевим трафіком. Алгоритми ШІ, засновані на даних, можуть бути дуже корисними для поліпшення продуктивності на MAC і мережевому рівні. Наприклад, за допомогою машинного навчання можна покращити алгоритми хендвера шляхом збору та аналізу даних про географічне середовище, такі як інформація про зони покриття, канали мовлення та шум, що допоможе визначити оптимальний момент переходу між базовими станціями і забезпечити плавний перехід без втрати якості зв'язку. Крім того, аналіз даних може допомогти виявити аномальну поведінку мережі та проблеми зі зв'язком, що дозволяє операторам рано виявляти та вирішувати проблеми з мережею. Отже, збір великої кількості даних, пов'язаних з масово підключеними пристроями, є ключовим для розробки і вдосконалення систем 6G. Ці дані можна використовувати для підвищення ефективності і продуктивності мережі на MAC і мережевому рівні, зниження загальних витрат на експлуатацію мережі і створення нових послуг в системах 6G, включаючи

покращення хендовера за рахунок аналізу географічних даних. Однак, необхідно забезпечити адекватний захист даних і забезпечити конфіденційність даних, зібраних в мережах 6G. Також, вони можуть допомогти планувальникам мереж оптимізувати розгортання мережі. З точки зору роботи мережі, вони можуть допомогти підвищити відмовостійкість мережі, прогножуючи мережевий трафік і виявляючи потенційні несправності.

Визначення методів доступу до каналу є однією з основних функцій MAC-рівня. Існує багато методів доступу, таких як TDMA, FDMA, CDMA та інші, які використовуються в різних мережевих технологіях. Крім того, MAC-рівень відповідає за керування взаємодією з протоколом фізичного рівня і забезпечення передачі даних від одного пристрою до іншого з використанням відповідних каналів. Щодо безпеки, MAC-рівень зазвичай використовує різні методи шифрування та автентифікації, щоб забезпечити захист від несанкціонованого доступу до мережі та збереження конфіденційності переданих даних. У випадку, якщо отриманий пакет даних не є безпечним, MAC-рівень може ініціювати процес повторної передачі пакету, щоб забезпечити його доставку. Однак, це може призвести до затримок у передачі даних, що може впливати на продуктивність мережі. Алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання можуть підвищити продуктивність MAC-рівня. Найбільш підходящими функціями для застосування алгоритмів ШІ та МН є розподіл ресурсів, планування, агрегація несучих, хендовер [1]. Крім того, це може зменшити накладні витрати на пакет MAC-даних і підвищити надійність передачі за допомогою технології HARQ, яка дозволяє вирішувати проблему передачі даних на далекі відстані, де канали можуть бути шумними або мають інші проблеми. HARQ використовується в бездротових мережах для покращення надійності передачі даних і зменшення кількості повторних передач. Технологія HARQ поєднує в собі ARQ та FEC, що дозволяє забезпечити високу якість передачі даних. Під час передачі даних HARQ пересилає лише ті пакети, які були пошкоджені в процесі передачі, зменшуючи накладні витрати на передачу даних. Для забезпечення подальшого підвищення надійності передачі, можна використовувати ШІ в HARQ. Методи ШІ можуть використовуватися для оптимізації параметрів передачі даних, що забезпечить вищу ефективність і надійність передачі. Наприклад, можна використовувати методи машинного навчання для передбачення оптимальної кількості повторів

пакета або оптимальної схеми кодування для передачі даних [2]. Таким чином, використання HARQ, оснащеного ШІ, дозволить знизити накладні витрати на пакет MAC-даних та підвищити надійність передачі даних в системах 6G.

Ключова роль мережевого рівня полягає забезпечені передачі пакетів даних від джерела до приймача через кілька вузлів, що можуть бути розташовані на різних мережевих сегментах. Це може включати маршрутизацію пакетів даних, розподіл навантаження між різними шляхами, забезпечення доставки даних у правильному порядку, а також контроль і керування потоком даних. Отже, мережевий рівень відповідає за маршрутизацію пакетів даних з одного вузла до іншого через кілька проміжних вузлів. При цьому, одним з основних завдань мережевого рівня є знаходження найкращого маршруту для передачі пакету даних від джерела до призначення. Це зазвичай здійснюється за допомогою алгоритмів маршрутизації, які оцінюють кілька критеріїв, таких як швидкість передачі, стійкість до помилок і витрати на мережу [3]. Крім того, мережевий рівень також відповідає за функції збирання та повторного збирання пакетів даних. Це важливо для забезпечення надійної передачі даних в мережі, особливо при наявності помилок передачі або втрати пакетів. У цьому випадку мережевий рівень може повторно відправляти пакети або збирати розірвані пакети для забезпечення повної передачі даних до призначення.

Методи ШІ та МН можуть допомогти знайти оптимальний шлях, вибрати обслуговуючі комірки та забезпечити хорошу якість обслуговування в системах зв'язку. Застосування методів ШІ та МН дає можливість збирати та обробляти великі обсяги даних з різних джерел, що дає змогу зробити більш точні та ефективні рішення. Також, застосування методів ШІ та МН в мережевому рівні може бути корисним для різних задач, таких як прогнозування трафіку, оптимізація розподілу ресурсів мережі, визначення оптимального маршруту між двома вузлами, розпізнавання аномальних паттернів трафіку [4].

Використання методів ШІ та МН в системах зв'язку може допомогти вирішити багато проблем, з якими стикаються оператори мобільного зв'язку, такі як забезпечення якості обслуговування (QoS), оптимізація маршрутизації, зниження витрат на енергопотребу та покращення загальної продуктивності мережі [5]. Крім того, вони підходять для збалансування трафікового навантаження мереж і поліпшення загальних послуг мереж шляхом

знаходження оптимального балансування навантаження.

Таблиця 2.1 – Потенціал ШІ та МН для підвищення ефективності, надійності та безпеки бездротових мереж

Завдання бездротової системи	Фізичний рівень	Канальний рівень передачі даних	Мережа та верхні рівні
Завдання штучного інтелекту			
Кластеризація	Виявлення сигналів, відображення символів	Кластеризація та об'єднання користувачів	Створення критичної мережі, Керування розміром кластера в динамічних гетерогенних мережах
Класифікація	Позиціонування, локалізація, визначення користувачів МІМО	Динамічне планування, Агрегація операторів, Оптимальна багатозв'язність	Допуск нарізки, планування, балансування навантаження
Регресія	Оцінювання каналів, вирівнювання	Адаптивне керування живленням	Динамічне керування зрізами
Прогнозування	Оцінювання сліпих каналів	Адаптивне керування потужністю, прогнозування радіосигналу, розподіл радіоресурсу	Моніторинг мережі, Оркестрування, Прогнозування трафіку, Прогнозування мобільності
Прийняття рішень	Кодування з виправленням помилок	Зменшення завад, передача	Управління мобільністю, Оптимальний маршрут

У таблиці 2.1 відображено великий потенціал ШІ та МН для покращення ефективності, надійності та безпеки бездротових мереж. Їхні методи можуть бути використані для підвищення продуктивності та зменшення накладних витрат в системах 6G. Зокрема, методи ШІ та МН можуть бути використані для

покращення керування ресурсами, оптимізації маршрутизації, підвищення надійності та зменшення затримок. ШІ можуть бути використані для розв'язання складних проблем у бездротових мережах, таких як розрідженість, нестабільність та забезпечення безпеки. Наприклад, вони можуть бути використані для розв'язання проблеми підключення великої кількості масово підключених пристроїв, що є ключовою функцією систем 6G. МН можуть допомогти вирішити проблему керування великою кількістю малопотужних пристроїв в мережі, забезпечивши оптимальну взаємодію між пристроями та базовими станціями. Вони також можуть бути використані для розробки ефективних алгоритмів маршрутизації, які можуть допомогти забезпечити оптимальну доставку даних в мережі [6]. У цілому, використання методів ШІ та МН може допомогти покращити ефективність та безпеку мереж та забезпечити кращу якість обслуговування для користувачів.

Отже, очікується, що системи 6G будуть мати набагато більші вимоги до пропускної здатності, затримки та енергоефективності порівняно з попередніми поколіннями мобільних систем зв'язку. За очікуваннями, 6G має надавати швидкість передачі даних на рівні до 1 Тбіт/секунду, що є в 100 разів швидше, ніж найбільша швидкість передачі даних в системах 5G. Щодо затримки, очікується, що 6G забезпечить зменшення затримки до менше 1 мілісекунди. Це можливо завдяки новим технологіям передачі даних, таким як використання міліметрових хвиль та масивів антен. Крім того, енергоефективність 6G буде ще більшою, що дозволить зменшити споживання енергії на передачу одиниці даних. Це можливо завдяки розвитку нових технологій передачі даних, таких як використання світлових хвиль та надширокосмугових радіохвиль. В цілому, системи 6G матимуть значно покращені характеристики порівняно з попередніми поколіннями мобільних систем зв'язку, що дозволить забезпечити більш ефективну та швидку передачу даних [7]. Системи 6G стикаються з новими викликами, які ставлять під сумнів поточні методи та підходи до розробки мереж зв'язку. Для того, щоб успішно вирішувати ці виклики, системи 6G будуються на основі концепції "розумної комунікації" та "розумної мережі", яка дозволяє створювати мережі зв'язку з високим рівнем гнучкості, масштабованості, стійкості, безпеки, ефективності та розподіленого інтелекту. Одним з головних викликів для систем 6G є необхідність підвищення ефективності використання ресурсів мережі зв'язку, оскільки обсяги передачі

даних виростають з кожним новим поколінням мобільних мереж. Щоб вирішити цей виклик, системи 6G мають базуватися на принципах розподіленого інтелекту, який дозволяє збільшувати продуктивність та ефективність мережі шляхом розподілу обчислювальних завдань між різними вузлами мережі. Одним із головних напрямків розвитку систем 6G є забезпечення високого рівня безпеки та приватності в мережах зв'язку. З метою забезпечення безпеки мереж зв'язку, системи 6G повинні базуватися на криптографічних методах з використанням квантових ключів та інших інноваційних методів. Також, системи 6G повинні мати високий рівень гнучкості та масштабованості, щоб забезпечувати мережеву інфраструктуру для різних сфер застосування, включаючи промисловість, транспорт, медицину [8].

Технології штучного інтелекту та машинного навчання допоможуть задовольнити вказані вимоги та створити нові послуги. Однак, завдання ШІ та МН можуть бути дуже обчислювально важкими та потребувати великої кількості ресурсів, включаючи обчислювальну потужність, пам'ять та пропускну здатність мережі зв'язку. Ці завдання можуть також містити безліч вузьких місць, які слід враховувати при застосуванні їх в бездротових системах. Одним з найважливіших вузьких місць є обмежені ресурси, які доступні для мобільних пристроїв та бездротових мереж. Низькопотужні пристрої, такі як датчики IoT, можуть мати дуже обмежену обчислювальну потужність та пам'ять, тоді як великі мобільні пристрої, такі як смартфони, можуть бути обмежені пропускну здатністю мережі зв'язку. Таким чином, дуже важливо враховувати ці обмеження при розробці та використанні систем ШІ та МН в бездротових мережах. Ще одним вузьким місцем може бути нестабільність зв'язку та перешкоди в мережі. Нестабільний зв'язок може призвести до переривання передачі даних та помилок в роботі системи ШІ та МН. Також, перешкоди в мережі можуть знизити пропускну здатність та збільшити затримки в мережі, що може суттєво впливати на продуктивність системи. Для успішного використання систем ШІ та МН в бездротових мережах необхідно розробляти алгоритми та методи, які забезпечують ефективне використання ресурсів мережі та пристроїв [9]. Наприклад, для отримання точних результатів при вирішенні завдань ШІ та МН необхідно мати достатню кількість якісних навчальних даних. Це може бути одним з викликів при розробці та застосуванні систем ШІ та МН. Для навчання моделей ШІ та МН необхідно мати навчальні

дані, які відображають реальність та покривають різноманітність можливих сценаріїв. Ці дані можуть бути дорогою із-за високих вимог до їх якості та кількості. Наприклад, для тренування моделей глибокого навчання потрібно від 10 тисяч до мільйонів прикладів. Також, навчальні дані повинні бути коректно позначеними та етикетованими, щоб моделі могли вчитися на прикладах з правильними відповідями. Неправильні або неякісні дані можуть призвести до неточностей в результаті моделі. Однак, деякі методи, такі як *transfer learning*, дозволяють використовувати попередньо навчені моделі та навчальні дані для тренування нових моделей для конкретних задач. Це дозволяє зменшити кількість необхідних навчальних даних та спростити процес тренування нових моделей. У цілому, наявність якісних навчальних даних є важливим фактором для успішного вирішення завдань ШІ та МН [1]. Однак, розробники можуть використовувати різні методи та технології для оптимізації використання наявних даних та зменшення кількості необхідних даних для навчання моделей.

Іноді при обробці персональних даних на пристроях може статися передача цих даних іншим особам. Це може статися, наприклад, якщо пристрій використовує хмарні сервіси для збереження та обробки даних, або якщо використовується додаток, який передає дані до сторонніх серверів. У таких випадках важливо забезпечити захист персональних даних та дотримання принципів конфіденційності та приватності. Наприклад, можна використовувати шифрування та інші методи захисту даних на пристроях, щоб унеможливити доступ до них неповідомим особам. Також можна обрати додатки та сервіси, які мають відповідні політики конфіденційності та приватності, та дотримуються правил обробки персональних даних. Для забезпечення захисту персональних даних важливо дотримуватися необхідних заходів безпеки та перевіряти джерела програмного забезпечення, які використовуються на пристроях та сервісах, щоб уникнути можливих ризиків порушення конфіденційності та приватності [2].

При виконанні завдань ШІ та МН в мережах IoT, може виникнути проблема недостатньої обчислювальної потужності сенсорних вузлів, що може призвести до додаткового використання мережевих ресурсів та високого енергоспоживання. Для розв'язання цієї проблеми можна використовувати розподілену обробку даних, коли завдання розбивається на менші частини, які виконуються на різних вузлах мережі. Також можна використовувати методи

компресії даних та видалення зайвої інформації, що допоможе зменшити обсяг переданих даних та знизити вимоги до мережевих ресурсів. Для зменшення енергоспоживання можна використовувати методи енергозбереження на сенсорних вузлах, такі як сонячні батареї або методи оптимізації використання енергії. Також можна використовувати механізми для зменшення частоти передачі даних, коли вони не потрібні в режимі реального часу [3]. Узагалі, ефективність та енергозбереження в мережах IoT є важливими факторами, які слід враховувати при виконанні завдань ШІ та МН в мережах IoT. Зокрема, в розподілених мережах, обчислювальні блоки, блоки розподілу та блоки зберігання даних можуть бути розділені, що може бути проблемою для подолання. Розподілені мережі можуть бути реалізовані з використанням різних протоколів та алгоритмів, таких як алгоритм консенсусу, який дозволяє вирішувати проблеми, пов'язані з надійністю та цілісністю даних в розподіленій мережі. Проте, існують деякі проблеми, пов'язані з розділенням обчислювальних блоків та блоків зберігання даних. Наприклад, коли обчислювальний блок та блок зберігання даних знаходяться на різних вузлах мережі, може виникнути проблема зі синхронізацією даних та керуванням доступом до цих даних. Ще однією проблемою може бути висока латентність, тобто затримка в передачі даних між різними вузлами мережі. Це може бути особливо проблематично в тих випадках, коли обчислювальний блок має взаємодіяти з даними, які зберігаються на іншому вузлі мережі. Окрім того, розподілені мережі можуть піддаватись різним видам атак, таким як атаки на вузли, атаки на канали зв'язку, атаки на протоколи зв'язку [4]. Тому важливо забезпечити безпеку мережі та даних, які обробляються в розподіленій мережі. Крім того, використання ШІ та МН алгоритмів у гетерогенних середовищах може призвести до погіршення продуктивності мережі через ряд причин. Перш за все, розгортання алгоритмів ШІ та МН у гетерогенних мережах може збільшити завантаження мережевих ресурсів, що призводить до зменшення ефективності використання ресурсів та затримок у передачі даних. Крім того, різні пристрої у гетерогенній мережі можуть мати різні обчислювальні можливості та пропускні здатності, що може створювати нерівномірне навантаження на різних пристроях. Це може призвести до зниження ефективності мережі та збільшення затримок у передачі даних. Для покращення продуктивності мережі можуть бути застосовані різні стратегії, такі як

балансування навантаження, оптимізація маршрутизації та використання механізмів кешування даних [5].

Отже, потрібен уніфікований інтерфейс, який зможе значно полегшити розгортання та використання глибоких нейронних мереж у розподілених обчислювальних середовищах. Одним з прикладів такого інтерфейсу є TensorFlow, що є відкритим програмним забезпеченням для розробки та розгортання глибоких нейронних мереж. TensorFlow надає уніфікований інтерфейс для побудови та навчання моделей глибокого навчання, а також підтримує розгортання моделей на різних платформах та у розподілених середовищах, таких як кластери та хмарні обчислення. Інші приклади таких інтерфейсів включають PyTorch та Keras. Такі інтерфейси допомагають забезпечити стандартизацію та спрощення розгортання глибоких нейронних мереж, знижуючи складність та вартість розробки та розгортання систем ШІ та МН.

3 ФІЗИЧНИЙ РІВЕНЬ ЗІ ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ

У бездротовому зв'язку основна мета фізичного рівня - забезпечити надійне та ефективне з'єднання для передачі даних шляхом моделювання бездротових каналів, проектування сигналу для передачі, виявлення ослабленого сигналу та пом'якшення наслідків погіршення якості каналу. Було проведено багато досліджень фізичного рівня стільникових систем з метою підвищення надійності, наприклад, рівня бітових помилок, та продуктивності, наприклад, пропускної здатності. Архітектура фізичного рівня була оптимізована з точки зору пропускної здатності та надійності. У цій розвиненій дослідницькій галузі дуже складно задовольнити вимоги 6G і ще більше підвищити продуктивність за допомогою нових технологій. Зокрема, фізичний рівень дуже чутливий до складності, затримок, енергоефективності та обчислювальної потужності. Існує багато перешкод для подолання проблем дослідження фізичного рівня. Стільникові системи, такі як 5G і 6G, встановлять високу планку і матимуть справу з величезними обсягами даних у своїх системах. Це середовище дозволяє нам застосовувати алгоритми AI до стільникових систем. Багато експертів зі штучного інтелекту та розробників бездротових систем прогнозують, що традиційні моделі бездротових систем будуть доповнені підходами, заснованими на даних, що базуються на штучному інтелекті. Звичайні бездротові системи були розроблені з наближенням до наскрізної простої математичної моделі. Знайти точну математичну модель для бездротової системи та отримати оптимальні значення параметрів бездротових систем зв'язку в принципі складно. Наприклад, методи попередніх спотворень в базовій смужі дозволяють нам лінеаризувати модель з нелінійними спотвореннями. Теорія зв'язку надає нам простий математичний аналіз. Однак проблеми нелінійності в реальному світі все ще залишаються складними для аналізу шляхом моделювання системи. Навіть це не завжди вдається, особливо на високих частотах. Здатність алгоритмів штучного інтелекту до навчання може стати потужним інструментом для адаптації змінного в часі середовища каналу та лінеаризації моделі. Підхід алгоритмів AI, що ґрунтується на даних, покращить їхні можливості, вивчаючи взаємозв'язки між входом і виходом. Цей підхід спрощує бездротові системи і дає нам нову можливість проектувати системи фізичного рівня з точки зору пропускної здатності, затримок,

енергоефективності та щільності з'єднань. Ключові особливості внеску AI у фізичний рівень можна підсумувати наступним чином: підхід, керований даними, високий паралелізм, дружні до апаратного забезпечення обчислення та гнучкість. Алгоритми AI підвищують ефективність каналу передачі даних за рахунок оптимізації компонентів фізичних рівнів, таких як модуляція, кодування каналу, рівень потужності, оцінка каналу, зменшення завад тощо. У фізичному рівні 6G алгоритми AI відіграватимуть ключову роль. У цьому розділі ми обговоримо, як алгоритми AI покращать продуктивність фізичного рівня і з якими перешкодами ми зіткнемося, щоб адаптувати алгоритми AI на фізичному рівні.

3.1 Особливості проектування фізичного рівня мережі 6G зі штучним інтелектом

Ключовими поняттями алгоритмів AI є адаптація та ітерація. Як ми обговорювали в першій частині, зворотне поширення глибокого навчання забезпечує нам оптимальні значення ваг на прихованих рівнях за допомогою адаптації та ітерації. Під час навчання нейронних мереж на великих обсягах даних значення ваг наближаються до оптимальних значень. Ці ключові концепції адаптації та ітерації вже прийняті і широко використовуються у фізичному рівні бездротового зв'язку. Наприклад, поширення переконання при декодуванні з низькою щільністю перевірки на парність (LDPC) базується на концепції ітерації. Адаптивна модуляція і техніка кодування покращують пропускну здатність за рахунок адаптації каналу. Від 1G до 5G продуктивність системи була покращена при адаптації цих концепцій до кожного компонента фізичного рівня. Архітектура фізичного рівня стільникових систем є стабільною і близькою до оптимальної. Таким чином, алгоритми AI спочатку використовувалися для вирішення проблем вищих рівнів, таких як проблема розподілу ресурсів, класифікація мережевого трафіку, виявлення несправностей тощо. Мобільні оператори мають багато складних завдань з управління мережевим трафіком, розподілу мережевих ресурсів та оптимізації продуктивності мережі. AI та НВІС-технології дозволяють обробляти великі обсяги даних, вивчати характеристики динамічних мережевих трафіків і ресурсів, отримувати ключові знання про роботу та управління мережею, а

також знаходити оптимальні мережеві рішення. Оператори мобільного зв'язку очікують оптимізації своїх мереж, збільшення пропускної здатності, зниження операційних витрат і створення нових послуг за рахунок інтеграції алгоритмів штучного інтелекту в мобільні мережі. Інтелектуальна робота мережі з використанням методів штучного інтелекту дозволяє досягти високої продуктивності мережі та ефективного управління мережевими ресурсами, а також створити нові послуги для користувачів мобільного зв'язку. Впровадження алгоритмів штучного інтелекту в мережі вимагає нового виклику, такого як ефективне управління мережевими даними, включаючи збір, структурування та аналіз величезних масивів даних. Впровадження цих алгоритмів на фізичному рівні поки що не було настільки активним. Дехто вважає, що важко очікувати величезного стрибка і досягти прориву на фізичному рівні. Однак через високі вимоги до фізичного рівня 6G та моделі успіху в різних галузях досліджень, впровадження алгоритмів штучного інтелекту на фізичному рівні зараз активно вивчається в академічних та промислових колах. Люди вважають, що методи AI стануть перспективним інструментом для вирішення складних проблем бездротових систем зв'язку. При розробці фізичного рівня з підтримкою AI можна виділити такі ключові моменти:

- 1) хороший баланс між моделями бездротових систем і підходом алгоритмів AI, заснованим на даних,
- 2) глобальна оптимізація в модульних блоках фізичного рівня,
- 3) компроміс між ефективністю навчання і продуктивністю,
- 4) нові метрики або методи навчання

Нові метрики або можливості навчання з точки зору різних показників системи зв'язку, таких як пропускна здатність, затримка, енергоефективність і так далі. Фізичний рівень стільникових систем залежить від математичної моделі для кожного компонента. Кожен компонент оптимізується індивідуально. У реальному світі блок-ланцюжки фізичного рівня є складними системами і мають багато невідомих недоліків і недосконалостей. Якщо математична модель може містити їх усі, то математична модель буде занадто складною для аналізу. Крім того, вона може страждати від неточних попередніх знань між моделлю і реальним світом. У цьому полягає обмеження модельного підходу. З іншого боку, підхід алгоритмів штучного інтелекту, заснований на

даних, використовує взаємозв'язок між входом і виходом. Він має менше припущень. Система фізичного рівня може бути оптимізована на величезній кількості навчальних даних. Нам не потрібна складна математична модель. Навчені алгоритми AI працюють швидше і споживають менше енергії, ніж звичайні алгоритми фізичного рівня, засновані на моделях. Алгоритми AI можуть компенсувати обмеження традиційних бездротових систем. Наприклад, алгоритми ШІ можуть експлуатувати модель фізичного рівня і використовувати попередні знання, такі як інформація про канал з моделі. Це може скоротити час навчання і підвищити продуктивність більш ефективно. Якщо ми зможемо знайти хороший баланс між двома підходами, системи фізичного рівня можуть бути ефективно розроблені. Модульні блоки фізичного рівня складаються з виявлення сигналу, кодування каналу синхронізації, модуляції тощо. Кожен блок оптимізується локально і незалежно. Таким чином, глобальна оптимізація не може бути гарантована. Оскільки бездротовий канал змінюється, а мобільні пристрої працюють у різних умовах, фізичний рівень повинен ефективно адаптуватися до них. Здатність алгоритмів штучного інтелекту до навчання може допомогти бездротовим системам адаптуватися до різних середовищ.

Як ми розглядали в першій частині, важливо навчати алгоритм AI на достатньому наборі даних. Навчання кожного блоку фізичного рівня може зайняти багато часу. Таким чином, важливо знайти оптимальний компроміс між ефективністю навчання та загальною продуктивністю. У системах 5G розробники бездротових систем зосереджуються не лише на пропускній здатності, але й на затримках, енергоефективності та інших аспектах. У системах 6G ми обов'язково беремо до уваги численні комунікаційні та мережеві показники. Вони повинні бути оптимізовані на наскрізному фізичному рівні. Крім того, одна метрика матиме різний пріоритет на різних блоках або рівнях системи. Наприклад, коефіцієнт бітових помилок є важливою метрикою для вимірювання продуктивності схем кодування і модуляції каналів на фізичному рівні. Однак на вищих рівнях цей показник не є добрим для оцінки продуктивності, оскільки вони виконують специфічні функції для конкретних додатків. Для них більш важливими є частота помилок у пакетах або частота повторної передачі. Таким чином, нам може знадобитися перевизначити метрики для оцінки та оптимізації всієї системи. Алгоритми штучного інтелекту повинні бути навчені відповідним чином. Ключові підходи

до проектування фізичного рівня з використанням методів AI можна підсумувати наступним чином:

Перепроєктування наскрізного ланцюжка фізичного рівня. Традиційні системи фізичного рівня проєктуються блочно. Концепція блокового проєктування забезпечує нам ефективний процес проєктування, і кожен блок окремо близький до оптимальної структури. Однак оптимізація кожного блоку, як правило, не гарантує оптимізації всієї системи фізичного рівня. Методи AI можуть допомогти нам досягти наскрізної оптимізації продуктивності фізичного рівня. Поєднання методів AI з комунікаційними технологіями принесе нам нові переваги. Це дасть можливість переосмислити архітектуру фізичного рівня з різних точок зору.

Реалізація алгоритмів штучного інтелекту на легких платформах та спільне проєктування HW-SW. При адаптації алгоритмів штучного інтелекту до фізичного рівня ми враховуємо ключові особливості проєктування та реалізації фізичного рівня. Зазвичай алгоритми AI вимагають навчання та інтенсивних обчислень з великими обсягами даних. Наприклад, обчислення алгоритмів AI повинні бути достатньо швидкими, щоб бути меншими за час когерентності каналу або час зміни параметрів системи. Зокрема, при застосуванні алгоритмів AI для наднадійного зв'язку з низькою затримкою (URLLC) затримка є ключовим показником продуктивності. Наприклад, у 6G URLLC наскрізна затримка не повинна перевищувати 1 мс.

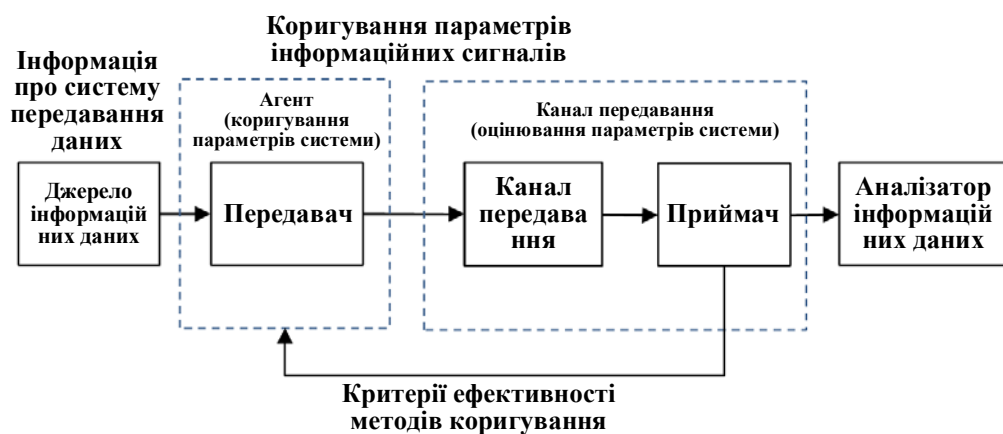


Рисунок 3.1 – Структура наскрізного фізичного рівня на основі RL

Затримка приблизно складається з часу обробки пристрою 0,3 мс, часу передачі 0,1 мс, часу обробки мережі 0,5 мс та іншого запасу 0,1 мс. Таким чином, алгоритми AI повинні працювати із затримкою менше 0,1 мс. Це зумовлює вищу частоту дискретизації сигналів 6G і більшу обчислювальну потужність для аналізу бездротових каналів, що змінюються в часі. У мережах радіодоступу обробка базової смуги на фізичному рівні виконується на користувачькому обладнанні та базовій станції. Хоча обчислювальна потужність користувачького обладнання зростає з кожним поколінням, робоче навантаження обробки базової смуги частот вже є значним на користувачькому обладнанні, і було б неефективно запускати алгоритми AI на користувачькому обладнанні. Таким чином, обробка базового діапазону на базових станціях підходить для перенесення алгоритмів AI на фізичний рівень. Для запуску алгоритмів AI інтелектуальні додатки з високими обчисленнями будуть розгорнуті на межі радіомереж. Бездротові з'єднання з високою надійністю, низькою затримкою і високою пропускнуою здатністю між користувачьким обладнанням і периферійними мережами будуть мати важливе значення в системах 6G. У системах 6G повинні підтримуватися розподілені обчислення і зберігання з достатнім рівнем захисту даних. Крім того, алгоритми AI працюють на спеціальних графічних процесорах (GPU) або центральних процесорах (CPU). Обчислювальна потужність базового діапазону обмежена, тому алгоритми AI повинні працювати з обмеженими обчислювальними потужностями, сховищами та джерелами енергії. Таким чином, для прискорення швидкості навчання та ефективної роботи алгоритмів AI слід розробляти легкі платформи з точки зору обчислювальної потужності, енергоефективності та надійності. Інша точка зору на реалізацію алгоритмів AI - це спільна розробка апаратного та програмного забезпечення (або спільна розробка алгоритмів AI та апаратного забезпечення). Спільне проектування апаратного та програмного забезпечення дозволяє нам розробляти апаратне та програмне забезпечення одночасно та економити час на розробку. Ми можемо оптимізувати продуктивність системи більш ефективно за допомогою ітеративного процесу спільного проектування HW-SW. Першим кроком спільного проектування HW-SW є специфікація системи та визначення архітектури фізичного рівня. Специфікація полягає у визначенні завдань фізичного рівня та описі поведінки, включаючи паралелізм, ієрархію, перехід

станів, синхронізацію і так далі. Уніфіковане представлення, таке як графіки потоків даних та мережі Петрі, може описати конкретні завдання фізичного рівня, які можуть бути реалізовані в HW або ПЗ. Другий крок - розбиття HW-SW. Цей крок є ключовою частиною спільного проектування HW-SW, оскільки він впливає на загальну продуктивність, час розробки та вартість. Основною метою розбиття HW-SW є проектування системи фізичного рівня для задоволення вимог (пропускна здатність, затримка, енергоефективність і т.д.) при заданих обмеженнях (вартість, потужність, складність і т.д.). Задача розбиття HW-SW зазвичай відома як багатовимірна оптимізаційна задача і недетермінована поліноміальна за часом жорстка (NP-жорстка) задача. Для вирішення цієї проблеми існує два основних підходи: конструктивні алгоритми та ітераційні алгоритми. Наступними кроками є розробка інтерфейсу HW/SW, спільний синтез та спільна верифікація. Цей етап підтримується багатьма інструментами автоматизації електронного проектування (EDA). Спільне проектування HW-SW є ефективним для реалізації наскрізного ланцюжка фізичного рівня. Це покращує продуктивність системи і забезпечує нам нижчі витрати і менший цикл розробки. З точки зору реалізації алгоритмів штучного інтелекту, реалізація алгоритмів штучного інтелекту з урахуванням HW буде корисною для подолання обмежень фізичного рівня. Розподіл завдань на платформі HW та SW буде ключовою функцією для ефективної реалізації алгоритму AI.

Нові алгоритми AI для функцій фізичного рівня. Нові алгоритми AI повинні бути розроблені таким чином, щоб задовольняти вимогам низької складності і розумної точності. Традиційно багато методів обробки сигналів (таких як виявлення сигналу, оцінка каналу, кодування і модуляція, зменшення завад тощо) на фізичному рівні базуються на максимальній правдоподібності (ML), максимальній апостеріорності (MAP), мінімальній середньоквадратичній похибці (MMSE), нульовому примусі (ZF) і так далі. Ці алгоритми надають нам оптимальне рішення в заданих умовах, але, як правило, включають складні обчислення, такі як робота з матрицями високої розмірності та велика кількість ітерацій. Таким чином, розробники бездротових систем повинні знайти хороший компроміс між продуктивністю та обчислювальною складністю шляхом евристичного налаштування параметрів. На практиці, евристичне налаштування параметрів виконується шляхом моделювання в різних

середовищах. Один вибір добре працює в умовах одного каналу, але він не дає нам хорошого компромісу, якщо канал змінюється. Таким чином, евристичні підходи нестабільні. Ми очікуємо, що алгоритми AI покращать проблему налаштування параметрів за рахунок навчання та здатності до глибокого навчання. Більшість алгоритмів AI покладаються на навчальний набір даних. Використовуючи аналіз великих даних, в системах 6G можна впровадити багато нових функцій. Наприклад, майбутні стани систем 6G можна передбачити на основі історичних даних. Це також може покращити дизайн системи 6G, виявлення несправностей, оптимальну конфігурацію тощо. Зокрема, за допомогою добре навчених моделей фізичного рівня можна вдосконалити наскрізний ланцюг зв'язку і досягти глобальної оптимальної побудови. Однак, якщо немає доступу до великого масиву даних, точність алгоритмів штучного інтелекту дуже низька. Збір даних безпосередньо пов'язаний з продуктивністю алгоритмів AI, і ми повинні ретельно відбирати набори даних із систем стільникового зв'язку. Набір даних, що генерується фізичним рівнем, містить інформацію про погіршення каналу в часовій, частотній і просторовій областях, наприклад, шуми в каналі, завмирання і перешкоди на різних частотах і в різний час. Нам потрібно витягти з цих наборів даних характеристики радіоданих і дані про завади в каналі та скоригувати такі параметри, як потужність передачі, напрямки формування променя, спектр, модуляція тощо. Крім того, підхід алгоритмів AI, що ґрунтується на даних, надасть нам нові можливості для проектування фізичного рівня. Алгоритми AI для фізичного рівня повинні розроблятися з урахуванням конкретного середовища фізичного рівня.

Вибір алгоритмів AI для покращення та поєднання алгоритмів AI з алгоритмами фізичного рівня. Як ми вже обговорювали в першій частині, основними сферами застосування алгоритмів AI є класифікація, кластеризація, регресія та прийняття рішень. Алгоритми AI поділяються на неконтрольоване навчання, контрольоване навчання, навчання з підкріпленням і глибоке навчання. Неконтрольоване навчання не потребує маркованих даних і витягує структури і закономірності даних з навченої моделі. Навчання під наглядом має мічені дані і будує модель з набору навчальних даних. Навчена модель дозволяє нам прогнозувати майбутні дані та знаходити закономірності. Навчання з підкріпленням змушує агента взаємодіяти з навколишнім

середовищем, максимізуючи винагороду. Агент вчиться, як діяти і досягати мети в навколишньому середовищі. Ми можемо приймати послідовність рішень оптимально. Глибоке навчання імітує людський мозок. Воно дозволяє нам вчитися на великих обсягах даних і передбачати закономірності даних. Багато алгоритмів фізичного рівня відповідають цим ключовим застосуванням і базовому механізму методів штучного інтелекту. Ми можемо переформулювати завдання фізичного рівня, щоб застосувати алгоритми AI. Методи навчання алгоритмів AI покращать продуктивність алгоритмів і моделей фізичного рівня. Можна просто адаптувати алгоритми AI до фізичного рівня. Наприклад, кластеризація за методом K-середнього буде корисною для зондування спектра, розподілу потужності та вибору релейних вузлів. На фізичному рівні ланцюжок блоків у передавачі та приймачі можна розкласти на кілька незалежних компонентів. Кожен компонент блок-ланцюга фізичного рівня виконує певні функції, і він може бути розроблений незалежно. Наприклад, моделювання каналів є однією з ключових тем досліджень фізичного рівня. Традиційне моделювання каналів робить припущення, щоб зменшити складність в різних умовах і спростити модель поширення сигналу. Характеристики каналу витягуються з величезних даних вимірювань, а моделі бездротових каналів будуються на основі ключових характеристик каналу. Важливим моментом традиційного моделювання каналів є пошук компромісу між точністю моделі та припущеннями. Ми можемо передбачити втрати на проходження, імпульсну характеристику каналу та модель поширення сигналу в гетерогенних мережах 6G за допомогою алгоритмів штучного інтелекту. Класифікація форм сигналу є одним з ключових моментів. Застарілі низьковимірні методи можуть розрізняти до 20 або 30 пристроїв, але алгоритми AI дозволяють нам розрізняти сотні пристроїв, вивчаючи ключові ознаки в зашумлених каналах. Алгоритми фізичного рівня засновані на оптимізації, керованій моделлю. Коли припущення моделі не збігаються з реальними бездротовими системами або умовами каналу, алгоритми фізичного рівня не забезпечують оптимальну продуктивність. Наприклад, один алгоритм фізичного рівня був розроблений для середовища каналу з низькою мобільністю. Алгоритм фізичного рівня не зміг показати нам найкращу продуктивність у середовищі каналу з високою мобільністю. Однак алгоритми AI, що використовують оптимізацію на основі даних, можуть адаптувати свої

параметри і виконувати тонку настройку в режимі реального часу за допомогою методів градієнтного спуску.

Як ми обговорювали в розділі 1, алгоритми AI можуть спочатку вносити свій вклад в ланцюжок блоків фізичного рівня як компоненти. На завершальному етапі обробка фізичного рівня може бути замінена обробкою фізичного рівня на основі AI з механізмом навчання.

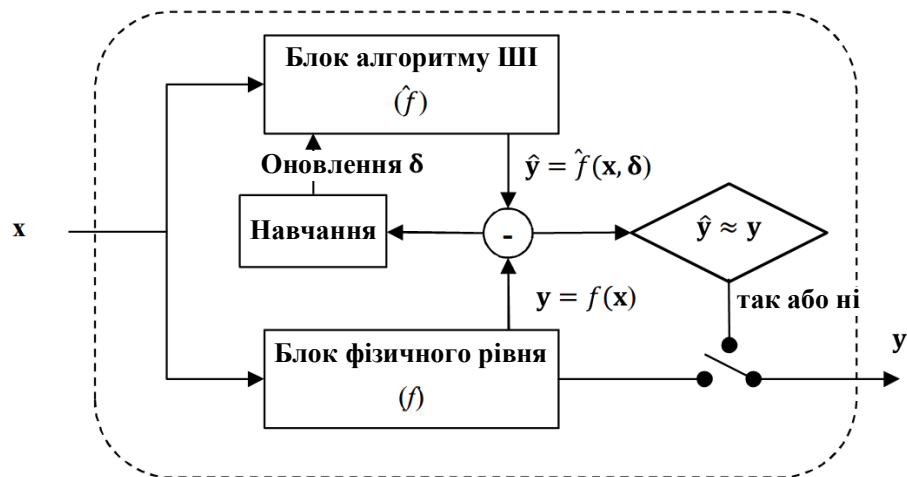


Рисунок 3.2 – Архітектура компонента фізичного рівня, що підтримує AI

Існує три основні підходи до покращення блоків фізичного рівня за допомогою алгоритмів AI. Перший підхід полягає в підтримці кожного блоку фізичного рівня. Багато блоків фізичного рівня знаходять оптимальне рішення ітеративно та адаптивно. Їх збіжність займає багато часу і вимагає високої складності. Алгоритми AI можуть допомогти знайти оптимальну точку і зменшити час і складність обчислень. На рисунку 3.2 показано архітектуру компонента фізичного рівня з підтримкою AI на основі першого підходу.

Як видно з рисунку 3.2, вхідні дані x подаються як на блок фізичного рівня, так і на блок алгоритмів AI. Обидва функціональні блоки можуть бути виражені як блок фізичного рівня:

$y = f(x)$ та блок алгоритму AI: $\hat{y} = \hat{f}(x, \delta)$, де δ , \hat{y} та y - параметри алгоритму AI параметри алгоритму AI, вихід блоку алгоритму AI та вихід блоку фізичного рівня відповідно. По-перше, ми навчаємо блок алгоритму AI в певний час на вхідному наборі навчальних даних, порівнюючи виходи обох блоків. По-друге, ми оновлюємо параметри блоку алгоритму AI δ . Якщо ми

маємо навчений блок алгоритму AI, ми можемо покращити блок фізичного рівня, порівнюючи виходи між ними. Коли ми маємо опуклі або неопуклі оптимізаційні задачі фізичного рівня, задача оптимізації формулюється і розв'язується за допомогою ітераційного процесу. Це вимагає величезної обчислювальної складності. Компонент фізичного рівня зі штучним інтелектом може вивчити взаємозв'язок між входом і виходом і виділити ключові властивості. Наближення дозволяє нам тренувати блок алгоритму AI. Використовуючи ці знання, ми можемо швидко досягти оптимальної точки, а також знайти хороший баланс між часом збіжності, точністю і складністю. Другий підхід полягає у включенні блоку алгоритму AI як додаткового блоку до компонента фізичного рівня, як показано на рис. 3.3.

На фізичному рівні існує багато нелінійних і непередбачуваних спотворень, таких як нелінійний підсилювач потужності. Зазвичай вони моделюються невідомою функцією. Ми маємо спотворений вихід $x = g(y)$ від невідомої функції. Спотворення оцінюється і компенсується функцією інверсії.

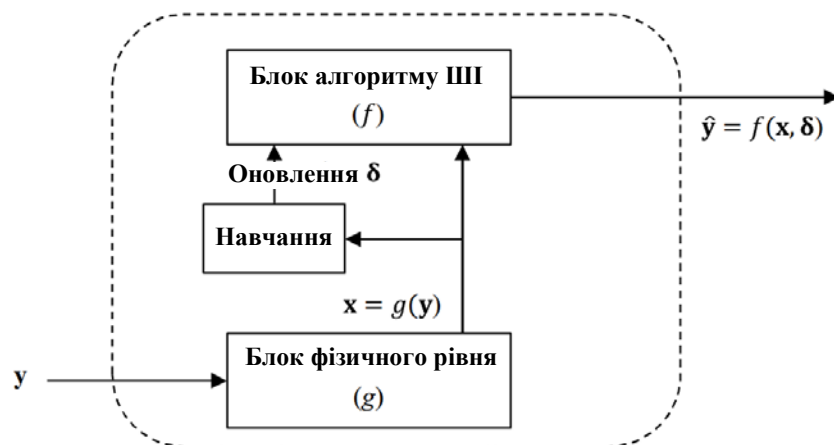


Рисунок 3.3 – Архітектура компонента фізичного рівня, що включає блок алгоритмів AI

Як ми бачимо на рисунку 3.3, блок алгоритму AI може діяти як функція інверсії. У блоці алгоритму AI виконується навчання, оновлюється параметр алгоритму AI δ і створюється модель функції інверсії. Навчений блок алгоритмів AI зменшує похибки апроксимації та досягає оптимального вигляду функції інверсії. Третій підхід полягає у поєднанні компонента

фізичного рівня та блоку алгоритму AI або заміні компонента фізичного рівня на блок алгоритму AI, як показано на рисунку 3.4.

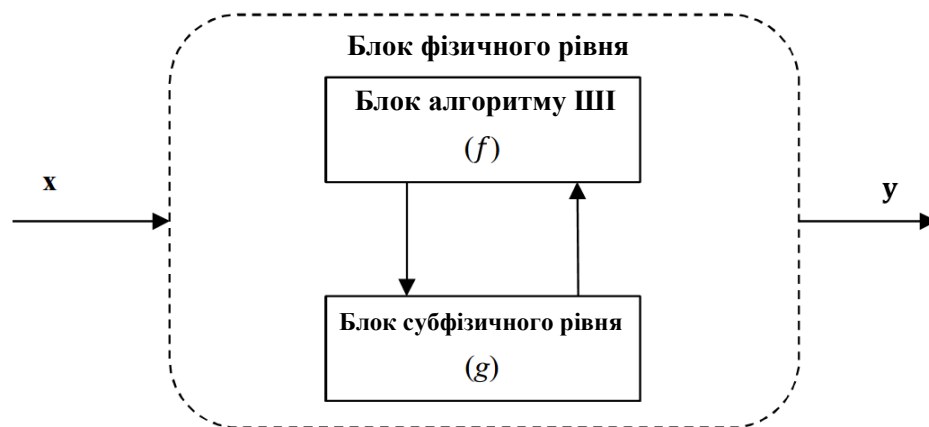


Рисунок 3.4 – Архітектура поєднання фізичного рівня та блоку алгоритмів AI

Деякі підфункції блоку фізичного рівня вже мають ключову концепцію ітерації та адаптації. Ці підфункції можуть бути покращені за допомогою нових алгоритмів AI. Багато з них можна оптимізувати. Ми можемо зменшити складність і час ітерацій звичайних блоків фізичного рівня і більш ефективно компенсувати багато спотворень передавача і приймача.

3.2 Особливості розроблення математичних моделей бездротових каналів передавання

Класичні бездротові канали розглядаються як невідомий чорний ящик. Вони є непередбачуваними шумами. Однак у сучасному бездротовому зв'язку вони класифікуються як гаусівський шум, джиттер, втрати на шляху, згасання, затінення, фазові та частотні шуми, завади тощо. Ці різні завади каналу по-різному впливають на передані сигнали. Отримання точної інформації про стан каналу (CSI) стає важливою частиною сучасних бездротових систем зв'язку. Розробники бездротових систем докладають багато зусиль для моделювання каналів. Однак, моделі бездротових каналів за своєю суттю є наближенням до реального бездротового каналу. Параметри моделей бездротових каналів повинні бути оцінені. Помилки оцінки неминучі. Фізичний рівень призначений для подолання цих недоліків каналу. Кожен компонент фізичного рівня

пом'якшує різні типи погіршень каналу і відновлює передані сигнали. Наприклад, один переданий сигнал надходить до приймача кількома шляхами бездротового каналу. Окремий бездротовий канал зазнає різних рівнів каналних ефектів. Методи диверсифікації використовують ці кілька отриманих сигналів з різних шляхів і пом'якшують багатопроменеві завмирання. Вони відіграють важливу роль на фізичному рівні для підвищення надійності. Маломасштабні завмирання класифікуються як плоскі завмирання ($B_s < B_c$), частотно-селективні завмирання ($B_s > B_c$), швидкі завмирання ($T_s > T_c$) і повільні завмирання ($T_s < T_c$), де B_s , B_c , T_s і T_c позначають відповідно смугу пропускання сигналу, когерентну смугу пропускання, часовий інтервал сигналу і час когерентності. Вони можуть моделюватися випадковими та детермінованими компонентами. Стохастична модель каналу з обома компонентами зазвичай будується на основі даних вимірювань у різних середовищах. Однак ця модель не може бути використана для прогнозування каналів, що змінюються в часі в реальному світі. Детерміновані компоненти можна отримати, знаючи поширення радіохвиль у певному середовищі, але важко передбачити випадкові компоненти. Системи 6G будуть використовувати методи AI для отримання знань про канал, включаючи випадкові компоненти, і прогнозування каналів, що змінюються в часі. Вони дозволяють бездротовій системі вивчати моделі каналів і адаптуватися до нових умов каналу. Для того, щоб реалізувати алгоритми ШІ, нам потрібно зібрати велику кількість даних вимірювань каналу, навчити моделі алгоритмів AI і передбачити знання про канал, такі як імпульсна характеристика каналу і так далі. Знання про канал будуть використовуватися в багатьох різних завданнях фізичного рівня і рівня передачі даних, включаючи MIMO, формування променя, розподіл ресурсів, управління потужністю і так далі. На основі моделі каналу, що характеризує реальне каналне середовище, визначаються вимоги до фізичного рівня.

Моделі каналів розробляються для складних сценаріїв каналів з багатьма типами шумів, нелінійностей та недосконалостей. Дизайн фізичного рівня залежить від умов каналу для подолання недоліків каналу. При адаптації алгоритмів FI до моделювання каналів однією з великих переваг є відсутність необхідності розробляти модель і зосередження на взаємозв'язку між входом і виходом каналу. Інформація про стан каналу, така як прийнята

потужність, середньоквадратичне запізнення, кутовий розкид, прогнозується за допомогою нейронних мереж прямого поширення та нейронних мереж з радіальною базисною функцією. ANN можна використовувати для видалення шуму з моделі імпульсної характеристики каналу, а аналіз головних компонент (PCA) дозволяє використовувати особливості моделі каналу. Множинні компоненти траєкторії кластеризуються за допомогою алгоритмів неконтрольованого навчання, таких як кластеризація за K-середнім та нечіткі алгоритми C-середніх. Згорткові нейронні мережі можуть бути застосовані для ідентифікації різних бездротових каналів. Вхідними параметрами CNN є багатопроменеві компоненти. Після навчання на основі даних вимірювань можна отримати результат класифікації різних бездротових каналів. У роботі запропоновано автономне контрольоване навчання для моделювання бездротових каналів і захисту особистої конфіденційності. Підхід з попереднім навчанням дозволяє вивчати детерміновані властивості бездротових каналів з автоматично згенерованої величезної кількості мічених даних. Навчена модель каналу здатна налаштувати модель. Таким чином, це може заощадити час навчання. Використовуючи підхід попереднього навчання, ми можемо отримати знання про канал у заданому середовищі та прогнозувати його для каналів, що змінюються в часі. Ефективність підходу з попереднім навчанням залежить від хорошої якості навчальних даних і нейронних мереж. Як ми розглядали в першій частині, рекурентна нейронна мережа (RNN) має справу з проблемами часової послідовності, оскільки її зв'язки утворюють спрямовані цикли. RNN підійде для моделювання каналу попереднього навчання. Однак модель каналу з попереднім навчанням не може бути узагальнена. Узагальнення більш реалістичних сценаріїв каналу було б одним великим дослідницьким завданням. Попередньо навчений канал може виділити особливості каналів і оновити ваги моделі, максимізуючи ймовірність правильного маркування даних. Можна навчати будь-які моделі каналів для конкретних завдань, включаючи формування променя, користувацький парінг тощо.

3.3 Математичні моделі систем MIMO із використанням штучного інтелекту

Технологія множинних входів і множинних виходів (MIMO) широко використовується в стільникових системах завдяки значному підвищенню продуктивності з точки зору коефіцієнта рознесення, коефіцієнта підсилення масиву і коефіцієнта мультиплексування. Ці покращення пов'язані з різними типами продуктивності системи. Виграш від різноманітності покращує надійність зв'язку і покриття під час передачі за рахунок зменшення різних типів багатопроменевих завмирань. Коефіцієнт підсилення решітки покращує покриття передачі та якість обслуговування. Коефіцієнт підсилення мультиплексування підвищує спектральну ефективність за рахунок передачі незалежних сигналів через різні антени. Існує певний компроміс між цими способами використання. Метою просторового рознесення є підвищення надійності при використанні одного потоку даних. Для цього розроблена схема просторово-часового кодування. З іншого боку, метою просторового мультиплексування є підвищення швидкості передачі даних при збереженні певного рівня надійності за допомогою декількох потоків даних.

Для цього використовуються вертикальне просторово-часове кодування (V-BLAST) і попереднє кодування MIMO. Як правило, просторово-часове кодування забезпечує хорошу продуктивність при низькому SNR, а просторове мультиплексування показує хорошу продуктивність при високому SNR. Стільникові системи використовують переваги різних типів MIMO, таких як масивне MIMO, багатокористувацьке MIMO і формування променя. Основна ідея методів MIMO базується на просторових кореляційних властивостях бездротових каналів та отриманні множинних некорельованих реплік сигналу. Просторове рознесення систем MIMO може бути досягнуто за рахунок використання декількох передавальних і приймальних антен. Кілька передавальних антен дозволяють досягти просторового рознесення передавача і отримати некорельовані сигнали із завмираннями. Рознесення передавача можна визначити як кількість незалежних каналів, що використовуються передавачем. Кілька приймальних антен дозволяють нам досягти рознесення простору приймача і отримати незалежні сигнали, що затухають, на приймачі. Рознесення приймача можна визначити як кількість незалежних каналів, що використовуються приймачем. Таким чином, продуктивність методів MIMO залежить від кореляції каналів.

Просторово-часове кодування - це спільна розробка схеми кодування, модуляції та рознесення каналів. Просторово-часові блокові коди (STBC) будуються з ортогональної матриці над антенами і часом і просто декодуються за допомогою декодування за максимальною правдоподібністю. Вони дозволяють досягти повної різноманітності, але демонструють недостатній вигравш у кодуванні. З іншого боку, просторово-часові коди (STTC) передають множинні та різноманітні послідовності даних через антени та час і відновлюють фактичну послідовність даних на приймачі. Вони можуть досягти як вигравшу в різноманітності, так і вигравшу в кодуванні. Однак складність декодування є вищою, оскільки процес декодування базується на спільній оцінці послідовності за максимальною правдоподібністю. Для проектування STBC розглянемо канал MIMO типу "точка-точка" з N_t передавальними антенами і N_r приймальними антенами, як показано на рисунку 3.5.

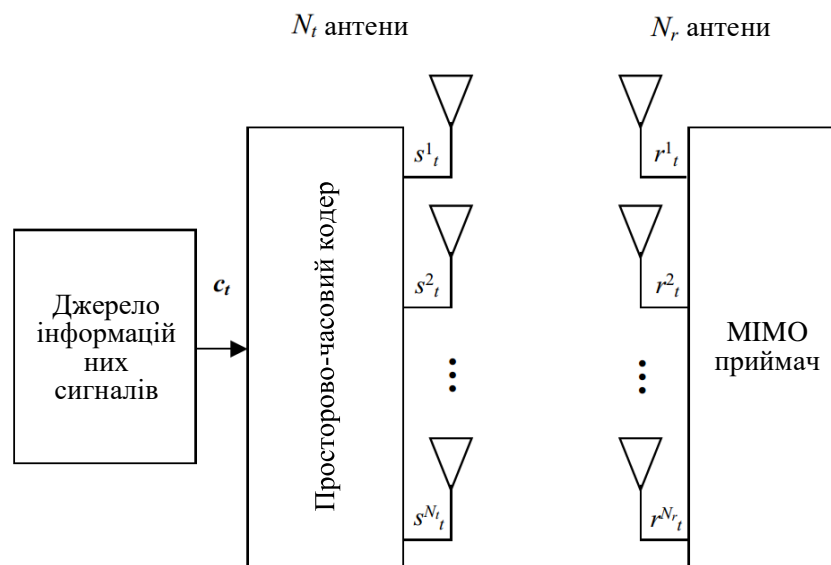


Рисунок 3.5 - Система MIMO для просторово-часового кодування

Блок джерела інформації генерує m символів наступним чином:

$$c_t = (c_t^1, c_t^2, \dots, c_t^m), \quad (3.1)$$

У просторово-часовому кодері m символів s_t відображаються в N_t символів модуляції з набору сигналів $M = 2m$, а вектор передачі представляється наступним чином:

$$s_t = \left(s_t^1, s_t^2, \dots, s_t^{N_t} \right)^T, \quad (3.2)$$

Передбачається канал MIMO без пам'яті. Система MIMO працює на повільно змінному каналі MIMO з плоскими завмираннями. Вектор передачі має довжину кадру L на кожній антені. Просторово-часова матриця кодів слів $N_t \times L$ визначається наступним чином:

$$S = [s_1, s_2, \dots, s_L] \Rightarrow \begin{matrix} \text{Time} \rightarrow \\ \left(\begin{array}{cccc} s_1^1 & s_2^1 & \dots & s_L^1 \\ s_1^2 & s_2^2 & \dots & s_L^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_1^{N_t} & s_2^{N_t} & \dots & s_L^{N_t} \end{array} \right) \end{matrix}, \quad (3.3)$$

а матриця каналів MIMO представлена матрицею $H_t \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ наступним чином:

$$H_t = \left(\begin{array}{cccc} h_{11}^t & h_{12}^t & \dots & h_{1N_t}^t \\ h_{21}^t & h_{22}^t & \dots & h_{2N_t}^t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1}^t & h_{N_r,2}^t & \dots & h_{N_r,N_t}^t \end{array} \right), \quad (3.4)$$

Кожен стовпчик S передається у заданому каналі. Оскільки передається m символів у L каналах, то швидкість STBC дорівнює $R = m/L$ символів/с. Якщо маємо сузір'я порядку M , то швидкість передачі дорівнює $R_b = m \log M$.

Розглядаються лінійні STBC, і відображення між символами та матрицями, що передаються, є лінійним наступним чином

$$S = \sum_{k=1}^m (A_k c_k + B_k c_k^*), \quad (3.5)$$

де c_k^* - комплексне спряження c_k , а матриці $N_t \times L$ A_k та B_k фіксовані. Правило відображення призначене для оптимізації виграшу від рознесення і мультиплексування та визначення продуктивності просторово-часового кодування. Наприклад, якщо код Аламуті ($L=2$, $m=2$), обидві матриці мають наступний вигляд:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

Можливе й інше представлення. Розділимо m комплексних символів на дійсні частини $\text{Re}()$ та уявні частини $\text{Im}()$ наступним чином:

$$r_k = \begin{cases} \text{Re}(c_k), & k=1, \dots, m \\ \text{Im}(c_k), & k=m+1, \dots, 2m \end{cases}, \quad (3.7)$$

де просторово-часові кодові слова можуть бути представлені наступним чином:

$$S = \sum_{k=1}^m (A_k c_k + B_k c_k^*) = \sum_{k=1}^{2m} C_k r_k, \quad (3.8)$$

де C_k виражається наступним чином:

$$C_k = \begin{cases} A_k + B_k, & k=1, \dots, m \\ j(A_{k-m} - B_{k-m}), & k=m+1, \dots, 2m \end{cases}, \quad (3.9)$$

Наприклад, якщо задано код Аламуті (L 2, m 2), то матриця C_k має такий вигляд:

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, C_3 = \begin{bmatrix} j & 0 \\ 0 & -j \end{bmatrix}, C_4 = \begin{bmatrix} 0 & j \\ j & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

Ортогональні просторово-часові блокові коди (OSTBC) є особливим класом лінійних STBC. Привабливі риси OSTBC зводяться до наступного:

- 1) повний вииграш у різноманітності,
- 2) проста структура приймача завдяки декодуванню за принципом максимальної правдоподібності,
- 3) максимальний SNR або мінімальний MSE,
- 4) легке усунення ISI завдяки ортогональності. OSTBC є оптимальними з точки зору виграшу в різноманітності та складності приймача, але неоптимальними з точки зору швидкості. Просторово-часова матриця кодів OSTBC має наступну властивість:

$$S^H S = \|c_t\|^2 I, \quad (3.11)$$

де

$$\|c_t\|^2 = \sum_{k=1}^m |c_t^k|^2, \quad (3.12)$$

а рядки кодів ортогональні з нормою ст 2. Крім того, матриця

$$C_k^H C_l = \begin{cases} I, & k=l \\ -C_l^H C_k, & k \neq l \end{cases}, \quad k, l = 1, \dots, 2m, \quad (3.13)$$

Припускається, що на приймачі використовується схема декодування за максимальною правдоподібністю та досконала ІСП. Таким чином, приймач має наступну метрику прийняття рішень:

$$\sum_{t=1}^L \sum_{j=1}^{N_r} \left| r_t^j - \sum_{i=1}^{N_t} h_{ji}^t s_t^i \right|^2, \quad (3.14)$$

Декодер максимальної правдоподібності знаходить кодові слова, які мінімізують (3.14).

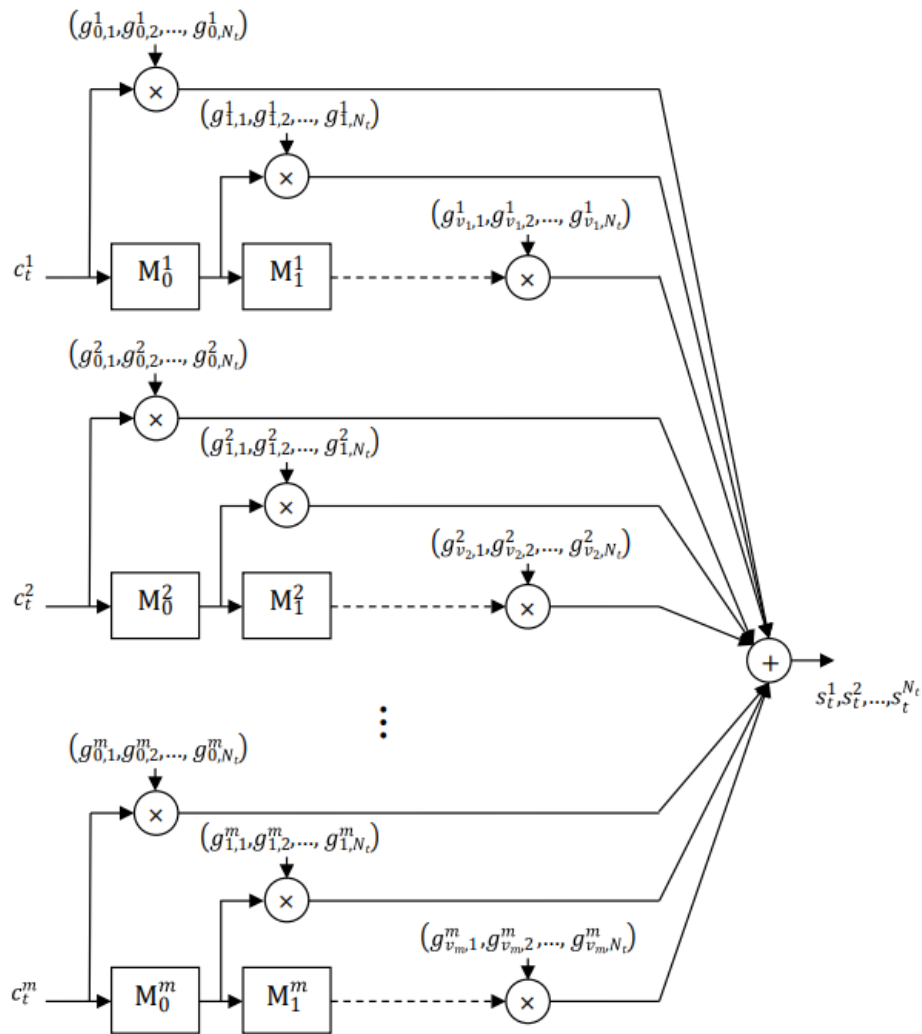


Рисунок 3.6 – Просторово-часовий решітчастий енкодер

Кодер STTC подібний до кодера TCM. На рисунки 3.6 зображено кодер STTC.

Як видно з рис. 3.31, вхідна послідовність s_t є блоком інформації (або кодованих бітів) у момент часу t і позначається через (c_1, c_2, \dots, c_m) . K -та вхідна

послідовність s_k проходить через k -й регістр зсуву і множиться на коефіцієнт кодера STTC g_k . Вона визначається наступним чином:

$$g^k = \left[\left(g_{0,1}^k, g_{0,2}^k, \dots, g_{0,N_t}^k \right), \left(g_{1,1}^k, g_{1,2}^k, \dots, g_{1,N_t}^k \right), \dots, \left(g_{v_m,1}^k, g_{v_m,2}^k, \dots, g_{v_m,N_t}^k \right) \right], \quad (3.15)$$

Кожен g_k представляє елемент M -арної множини сигнальних сузір'їв, а v_m представляє порядок пам'яті k -го зсувного регістра. Якщо розглядати модуляцію QPSK, то вона має один з наборів сигнальних сузір'їв $\{0, 1, 2, 3\}$. Кодер STTC відображає їх у символ з M -модуляцією і позначається $(s_1, s_2, \dots, s_{N_t})$. Вихід кодера STTC обчислюється наступним чином:

$$s_t^i = \sum_{k=1}^m \sum_{l=0}^{v_k} g_{l,l}^k c_{t-j}^k \mod 2^m, \quad (3.16)$$

де $i = 1, 2, \dots, N_t$. Виходи помножувачів підсумовуються за модулем 2^m . Модульовані символи s_i передаються паралельно через N_t передавальних антен. Загальний порядок пам'яті кодера STTC становить v і визначається наступним чином:

$$v = \sum_{k=1}^m v_k, \quad (3.17)$$

та v_k визначається наступним чином:

$$v_k = \left\lceil \frac{v + k - 1}{m} \right\rceil, \quad (3.18)$$

Стан решітки кодера STTC дорівнює $2v$. Ми припускаємо, що r_{tj} - це прийнятий сигнал на приймальній антені j в момент часу t , приймач отримує ідеальну CSI, а метрика гілки обчислюється як квадрат евклідової відстані між

фактично прийнятим сигналом і гіпотетично прийнятими сигналами наступним чином:

$$\sum_{j=1}^{N_r} |r_t^j - \sum_{i=1}^{N_t} h_{ji}^t s_t^i|^2, \quad (3.19)$$

Декодер STTC використовує алгоритм Вітербі для вибору шляху з найменшою метрикою. Розглянемо систему просторового мультиплексування з N_t передавальних антен і N_r приймальних антен і припустимо $N_r \geq N_t$. Прийнятий сигнал r (вектор-стовпець $N_r \times 1$) може бути виражений наступним чином :

$$r = Hs + n, \quad (3.20)$$

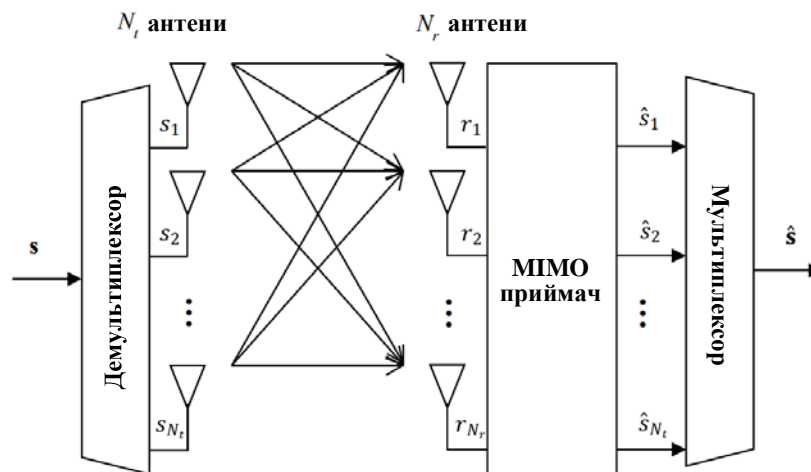


Рисунок 3.7 – Система MIMO для просторового мультиплексування

де H , s і n - матриця каналу MIMO розміром $N_r \times N_t$, $N_t \times 1$ передавальний сигнал і $N_r \times 1$ вектор білого гаусівського шуму відповідно. Елемент r_j , виражається як суперпозиція всіх елементів s . Рисунок 3.7 ілюструє систему MIMO для просторового мультиплексування.

Визначення максимальної правдоподібності полягає у знаходженні найбільш ймовірного \hat{s} наступним чином:

$$\hat{s}_{ML} = \arg \min_{s \in S} \| r - Hs \|^2, \quad (3.21)$$

де позначає норму матриці. Найімовірніше, s є елементом множини S . Таким чином, простий розв'язок полягає у переборі всіх можливих елементів множини S і виборі одного, який задовольняє (3.21). Це називається складною задачею недетермінованого полінома (NP). Складність зростає експоненціально відповідно до кількості передавальних антен і порядку модуляції. Лінійні методи виявлення, такі як узгоджений фільтр (MF), нульове придушення (ZF) і мінімальна середньоквадратична помилка (MMSE), використовують інверсію каналу MIMO. Оцінка переданого символу обчислюється за допомогою версії каналу MIMO, множення і квантування. Метод виявлення МП є одним з найпростіших методів виявлення, який полягає в наступному:

$$\hat{s}_{MF} = Qtz\left(H^H r\right), \quad (3.22)$$

де $Qtz()$ - квантування. Оцінені символи отримуються шляхом мультиплікації отриманих символів за допомогою операції Ерміта над матрицею каналів MIMO. Метод виявлення ZF використовує псевдообернену матрицю каналів MIMO. Коли матриця каналу MIMO є квадратною ($N \times N$) та інвертованою, оцінка символів при виявленні ZF виражається наступним чином:

$$\hat{s}_{ZF} = Qtz\left(H^{-1} r\right), \quad (3.23)$$

Коли матриця каналу MIMO не квадратна ($N \neq N$), вона виражається наступним чином:

$$\hat{s}_{ZF} = Qtz\left(\left(H^H H\right)^{-1} H^H r\right), \quad (3.24)$$

Як бачимо з (3.23) і (3.24), метод виявлення ZF прирівнює амплітуду завад до нуля, ігноруючи шумовий ефект. Таким чином, метод виявлення MMSE з урахуванням шумового ефекту забезпечує кращу ефективність, ніж метод виявлення ZF. Метод виявлення MMSE мінімізує середньоквадратичну похибку. Це виражається наступним чином:

$$\hat{s}_{ZFMMSE} = \text{Qtz} \left(\left(H^H H + N_0 I \right)^{-1} H^H r \right) . \quad (3.25)$$

де I та N_0 - матриця ідентичності та шум. Як бачимо з (3.25), потрібна точна оцінка шуму. Якщо шумовий член N_0 дорівнює нулю, то метод виявлення MMSE такий самий, як і метод виявлення ZF. При лінійному виявленні точна оцінка матриці каналу MIMO є важливою частиною, і таке виявлення корисне при високому SNR. Метод послідовного придушення завад (SIC) знаходиться між виявленням ML і лінійним виявленням. Він забезпечує кращу продуктивність, ніж лінійне виявлення. Виявлення SIC використовує обнулення і скасування для виділення переданих символів з прийнятих. При виявленні одного шару (часткової послідовності символів від однієї передавальної антени) оцінка переданого шару виконується шляхом віднімання від виявлених шарів у попередній раз. Обнулення і скасування виконуються до тих пір, поки не будуть виявлені всі шари. Виявлення SIC показує нам хорошу продуктивність при низькому SNR. Недоліком є те, що SIC страждає від поширення помилок. Коли неправильне рішення приймається в будь-якому шарі, воно впливає на інші шари. Таким чином, техніка впорядкування використовується для мінімізації ефекту розповсюдження помилок. При обнуленні та скасуванні з використанням методу впорядкування перший символ з високим SNR передається як найнадійніший символ. Потім передаються символи з нижчим SNR. Як лінійне виявлення, так і виявлення SIC не можуть досягти ефективності виявлення ML, навіть якщо вони мають меншу складність, ніж виявлення ML.

Масивна MIMO (також відома як великомасштабна антенна система, повнорозмірна MIMO або дуже велика MIMO) була представлена в 2010 році. Масивна MIMO є невід'ємною частиною систем 5G, особливо в діапазонах до 6 ГГц. Мережева конфігурація систем масивного MIMO розглядається як базова станція, обладнана великими антенними решітками, які одночасно обслуговують багато мобільних пристроїв. У порівнянні з технологією 4G MIMO, технологія масивного MIMO 5G забезпечує більш високу спектральну ефективність за рахунок просторового мультиплексування багатьох мобільних пристроїв і енергоефективність за рахунок зниження випромінюваної

потужності. Ключові технічні характеристики масивного MIMO можна підсумувати наступним чином:

- 1) операція TDD необхідна через взаємність,
- 2) зміцнення каналу усуває ефект швидких завмирань. Якість зв'язку змінюється повільно. Це корисно для проблем розподілу ресурсів,
- 3) замкнутий бюджет каналу зв'язку пропорційний кількості антен на базовій станції. Покращення бюджету каналу зв'язку корисне для загального покращення QoS в комірці,
- 4) відносно низька складність алгоритмів попереднього кодування і декодування,
- 5) повна цифрова обробка корисна як для спектральної ефективності, так і для енергоефективності. Крім того, це зменшує точність і швидкість реакції радіочастотної конструкції. Якщо ми можемо мати необмежену кількість антен, необмеженої пропускної здатності можна досягти за певних умов:

- 1) просторово корельовані канали,
- 2) оцінка каналу MMSE
- 3) оптимальне лінійне об'єднання. Незважаючи на ці переваги, існують практичні обмеження масивного MIMO.

Наприклад, чим більше антен, тим краща продуктивність, але межа продуктивності залежить від часу когерентності та пропускної здатності. Особливо, в умовах високої мобільності, вона вимагає меншого часу когерентності і більшої кількості пілотного сигналу. Крім того, він має обмежену кількість ортогональних пілотів через забруднення пілотів. Вузкий промінь, що генерується масивною MIMO, дуже чутливий до руху мобільних пристроїв або коливань антенної решітки.

Системи MIMO реалізуються в стільникових системах двома способами: однокористувацькі MIMO і багатокористувацькі MIMO. Як видно з назви, система MIMO з одним користувачем включає в себе один передавач і один приймач. Кількома антенами, розташованими на достатній відстані один від одного, оснащується одна базова станція або одне користувацьке обладнання. Багатокористувацька система MIMO включає один або кілька передавачів і один або кілька приймачів з однією або кількома антенами. Кілька антен, як віртуальні MIMO, можуть бути розподілені по різних місцях. Для того, щоб отримати переваги в системах MIMO, існує безліч дослідницьких завдань.

Наприклад, якщо канал MIMO має низький ранг, важко отримати достатній коефіцієнт мультиплексування. Відстань між антенами і накладні витрати на оцінку каналу є ключовими проблемами дослідження. У користувацькому обладнанні це неможливо реалізувати за допомогою великої кількості антен. Крім того, масивне MIMO вимагає великих розмірів пілотів. Це призводить до великих накладних витрат на оцінку каналу. Багатокористувацьке MIMO може подолати проблеми сигналу користувача MIMO.

Таблиця 3.1 – Підходи до проектування систем MIMO зі штучним інтелектом

Методи MIMO	Підходи до проектування
Вибір променя	CNN для класифікації інформації про променевий канал серед множини класів, що представляють номери променів
Розпізнавання радіомодуляції	CNN використовує два різних набори даних для високоточного автоматичного розпізнавання модуляції (AMR)
Попереднє кодування та отримання CSI	Використовуючи навчену нейронну мережу та миттєвий і статистичний CSI, попереднє кодування векторів призначене для максимізації сумарної швидкості за умови обмеження загальної потужності передачі. Складність попереднього кодування MIMO суттєво зменшується порівняно з існуючим ітеративним алгоритмом
Вибір антени	CNN для вибору MIMO-антени та проектування гібридного формувача променя
Виявлення MIMO	Проблема виявлення MIMO розглядається як проблема кластеризації при неконтрольованому навчанні

Багатокористувацьке MIMO дозволяє базовій станції мати велику кількість антен, а декільком мобільним пристроям - одну антену. У системах 6G масові системи MIMO також розглядаються через багато переваг. Існує багато підходів до застосування методів AI в системах MIMO і вирішення цих

проблем. Основні підходи до застосування алгоритмів ШІ в системах МІМО можна узагальнити, як показано в Таблиці 3.1.

Як ми вже обговорювали, алгоритми АІ будуть корисними для отримання точних CSI. Точний CSI матиме великий вплив на покращення численних переваг систем МІМО. Властивість величезних обсягів даних масивних систем МІМО є гарним середовищем для впровадження алгоритмів АІ. Алгоритми АІ будуть корисні для аналізу величезних даних, що генеруються масивними системами МІМО. Масивна антенна решітка має великий розмір матриці, а виявлення сигналу та оцінка каналу масивної антенної решітки вимагають великих обчислювальних потужностей. Особливо, пілотне забруднення масивних систем МІМО безпосередньо пов'язане з продуктивністю. Вона виникає через інтерференцію між сусідніми стільниками і погіршує точність інформації про стан каналу. В роботі, використовуючи метод розрідженого байєсівського навчання, отримано інформацію про стан каналу в масивних системах МІМО. Це забезпечує кращу продуктивність в експериментальному середовищі із завадами. При виявленні МІМО ітераційні методи забезпечують хорошу продуктивність, але вони можуть вимагати попередніх знань, таких як розподіл каналів. Вони можуть не працювати в умовах швидких завмирань або складного каналного середовища. Ми можемо об'єднати алгоритм АІ та алгоритм виявлення МІМО і підвищити продуктивність. Наприклад, алгоритм виявлення МІМО може зменшити кількість змінних для навчання, а навчений алгоритм АІ може зменшити час збіжності. Цей підхід може бути корисним для особливо масивних МІМО-систем, які мають багато параметрів у каналах, що змінюються в часі.

Як ми вже обговорювали МІМО-детектор, що включає ML, MF, ZF і MMSE для просторового мультиплексування, ML-детектор є оптимальним детектором з точки зору мінімальної сумарної ймовірності помилки при виявленні всіх символів. Він може бути реалізований сферичним декодером або іншими. На практиці складність реалізації МІМО-детектора має важливе значення. Алгоритми пошуку, такі як сферний декодер, мають високу обчислювальну складність. Тому в стільникових системах широко застосовуються субоптимальні алгоритми виявлення, такі як MF, ZF і MMSE. Основна концепція теорії виявлення збігається з класифікацією алгоритмів АІ. Обидва вони приймають рішення або знаходять закономірність у зашумленому

наборі даних. Основна відмінність між ними полягає в підході до проектування. Теорія виявлення базується на імовірнісній моделі клітинної системи. Алгоритми AI мають підхід, керований даними. При виявленні MIMO задається модель системи, яка може генерувати синтетичний набір даних. Теорія виявлення знаходить найкращу оцінку з зашумленого набору даних, тоді як алгоритми AI знаходять найкраще правило, яке потрібно застосувати. З точки зору реалізації, обчислювальна складність зростає, оскільки ми маємо новий набір даних. Однак при реалізації алгоритмів AI важку обчислювальну частину можна виконати в автономному режимі. Після того, як знайдено найкраще правило, вартість реалізації стає доступною. У приймач MIMO використовує природну властивість, що прийняті сигнали утворюють кластери, які представляють передані символи. Використовуючи машинне навчання, MIMO-передавачі переробляються. Проблема виявлення MIMO розглядається як проблема кластеризації при неконтрольованому навчанні. Основний підхід полягає в застосуванні алгоритму максимізації математичного сподівання для кластеризації набору даних, описаного моделлю гауссової суміші. Реалізація цього підходу пов'язана з двома основними проблемами. По-перше, результати кластеризації вказують на приналежність отриманого набору сигналів до тих самих переданих сигналів, але це не може пояснити відповідність між результатами кластеризації та переданими сигналами. По-друге, кожен кластер оцінюється за власним шаблоном. Для кластеризації кількість кластерів має бути значно меншою, ніж кількість отриманих сигналів. Для того, щоб подолати ці дві проблеми, використовується передача з мітками та модель гауссової суміші з обмеженою модуляцією. Передача з мітками дозволяє нам мати відповідність між кластерами і символами, що передаються, але вона вимагає накладних витрат на мітки. Модель гауссової суміші з обмеженням модуляції дозволяє мінімізувати кількість параметрів для точної кластеризації.

Масштабне MIMO стане однією з ключових технологій в системах 6G. Базова станція 6G, обладнана сотнями антен централізовано або розподілено, зменшить багатокористувацькі перешкоди і підвищить пропускну здатність системи. Для того, щоб впровадити масові системи MIMO на базових станціях, важливо отримати точну інформацію про стан каналу (CSI). У системах LTE MIMO використовується CSI низхідної лінії зв'язку, а для зменшення накладних витрат на канал зворотного зв'язку застосовується векторне

квантування або кодова книга. Однак, якщо кількість антен збільшується, канал зворотного зв'язку несе велике навантаження на системи MIMO. Таким чином, цей підхід не може бути використаний для масового MIMO. Зменшення накладних витрат на канал зворотного зв'язку є одним з ключових дослідницьких завдань при впровадженні масивних систем MIMO. У системах 5G розглядаються компресійні методи зондування. Основна концепція базується на переході від корельованих CSI до некорельованих розріджених векторів. Метод стисненого зондування дозволяє отримати точну оцінку розрідженого вектора. Однак цей підхід має багато проблем, таких як припущення про розрідженість каналу, випадкова проекція та повільний час відновлення сигналу. Підходи глибокого навчання будуть корисними для реконструкції природних зображень, отриманих за допомогою компресійного зондування. Кодер CSI, що використовує глибоке навчання, був прийнятий в замкнутій системі MIMO. Використовуючи концепцію глибокого навчання, CSI можна відновити з гарною якістю реконструкції.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ КАНАЛЬНОГО РІВНЯ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ЗІ ШТУЧНИМ ІНТЕЛЕКТОМ

Технології бездротового зв'язку і мереж швидко змінюються. Системи 6G будуть динамічними, гетерогенними, великомасштабними і складними мережами і вимагатимуть більш високої продуктивності багатьох додатків і послуг. Щоб відповідати новим вимогам, протоколи загального призначення можуть бути замінені протоколами, адаптованими до конкретних додатків. Поточний дизайн протоколів базується на емпіричних правилах управління або мережевих конфігураціях з певними пороговими значеннями, які можуть бути скориговані мережевими операторами. Конфігурація мережі визначається методом проб і помилок в залежності від мережевого середовища і сценаріїв. Для того, щоб задовольнити вищі вимоги до мережевої системи і надати мобільному користувачеві кращі послуги, ми повинні подолати різні бездротові канали і динамічно мінливі характеристики мережі. Таким чином, потрібне більш інтелектуальне управління та експлуатація мережі. Канальний рівень бездротових систем призначений для прийому даних, перетворення їх у пакети і відправки через базове обладнання для надійної передачі. Основна мета каналного рівня в стільникових системах - максимально ефективно використовувати радіоресурси. Ключовими функціями каналного рівня є мультиплексування потоків даних, виявлення кадрів даних, доступ до середовища, розподіл радіоресурсів і контроль помилок для забезпечення надійного з'єднання. У контексті бездротових систем здатність алгоритмів AI до навчання охоплює контекстну обізнаність та інтелект бездротових систем. Підхід, заснований на даних, набув популярності. Він зможе сприяти більш інтелектуальній поведінці бездротових систем. Цей підхід може бути застосований до рівнів каналу передачі даних, включаючи розподіл ресурсів, планування, агрегацію даних, локалізацію і так далі. У цьому розділі ми обговоримо, як відбувається розподіл радіоресурсів, як алгоритми штучного інтелекту покращать продуктивність каналного рівня і які дослідницькі виклики стоять перед нами. Зокрема, ми зосередимося на темі розподілу ресурсів.

4.1 Особливості проектування каналного рівня мережі 5G NR з штучним інтелектом

У новому радіо 5G (NR) рівень 1 (L1) - це фізичний рівень. Рівень 2 (L2) 5G - це рівень передачі даних, що складається з управління доступом до середовища (MAC), управління радіоканалом (RLC) і протоколу конвергенції пакетних даних (PDCP). Основна роль рівня MAC полягає у відображенні інформації між логічними каналами і транспортними каналами. Логічні канали представляють такі типи інформації, як канали управління і канали трафіку. Транспортні канали вказують, як мультиплексувати логічні дані і транспортувати інформацію через радіоінтерфейс. Інші ключові функції MAC-рівня зводяться до наступного: повідомлення про планування інформації у висхідній лінії, гібридний автоматичний запит на повторення (HARQ) як у низхідній, так і у висхідній лінії, а також визначення пріоритетів логічних каналів у висхідній лінії. RLC має три різні режими роботи: Прозорий режим (TM), режим без підтвердження (UM) і режим з підтвердженням (AM). RLC обслуговує різні логічні канали з точки зору їхніх вимог, і основні функції RLC залежать від режимів передачі. Функції рівня RLC можна підсумувати наступним чином: передача верхнього рівня в одному з трьох режимів передачі, конкатенація, сегментація і повторна збірка службових блоків даних (SDU) RLC в режимах UM і AM, HARQ в режимі передачі даних AM, переупорядкування RLC в режимах UM і AM, виявлення дублікатів в режимах UM і AM, ресегментація RLC в режимі AM, відкидання SDU RLC, відновлення RLC і так далі. Рівень PDCP надає наступні послуги верхнім або нижнім рівням: передача даних користувача і даних площини управління, стиснення і розпакування заголовків, шифрування і дешифрування, захист цілісності і перевірка даних площини управління, переупорядкування і так далі. Основні функції другого рівня 5G подібні до функцій другого рівня 4G. Канальний рівень систем 6G може бути подібним до каналного рівня 5G. На основі структури каналного рівня 5G каналний рівень 6G може використовувати нові функції, такі як підтримка терагерцового зв'язку, підтримка розподіленого зв'язку, безстільниковий доступ тощо. На рисунку 4.1 показано стек протоколів 5G NR L1 і L2.

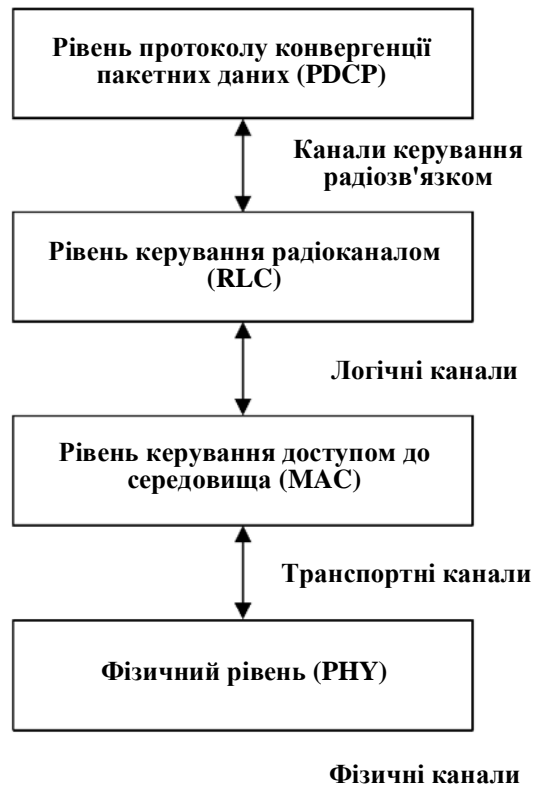


Рисунок 4.1 – Структура протоколу 5G NR

Функцію каналного рівня можна розглядати як відображення від сприйнятої інформації про стан мережі до вибору мережевих конфігурацій. Це схоже на підходи до навчання з підкріпленням або глибокого навчання. З цієї точки зору, структура навчання з підкріпленням або глибокого навчання може бути побудована на каналному рівні. У бездротових системах алгоритми ШІ зможуть навчатися на основі даних, а потім витягувати закономірності або прогнозувати майбутні дані. Здатність до навчання може бути використана для підвищення продуктивності або створення нового додатку в бездротових системах. Закономірності або прогнози алгоритмів ШІ можуть бути використані для налаштування параметрів бездротових мереж та ефективної роботи бездротових мереж. Використовуючи зібрані дані з мобільних пристроїв, алгоритми ШІ можуть генерувати нову інформацію, яку можна використовувати в різних додатках, таких як локалізація, аналіз використання мобільних даних тощо. Зокрема, системи 5G і 6G генерують багато різних типів великих даних у своїх мережах. Під час моніторингу мережі, а також зв'язку між мобільними пристроями та мережами, системи 6G можуть збирати дані про

пропускну здатність, затримку, втрату пакетів, джиттер, використання спектру тощо. Алгоритми штучного інтелекту можуть аналізувати великі обсяги даних, оптимізувати конфігурації бездротових мереж і покращувати продуктивність та послуги для кінцевих користувачів.

Залежно від типу даних, вхідних даних, типів мереж, додатків тощо, внесок AI в системи 6G буде різним. Ключовими функціями канального рівня є забезпечення зв'язку між мобільними пристроями і мережами та ефективно використання радіоресурсу. Це одна з ключових функцій бездротових систем. Через мінливі в часі бездротові канали та мережеві середовища дуже складно задовольнити всі вимоги та умови. MAC-рівень бере на себе відповідальність за управління ними. Існує багато типів схем множинного доступу, таких як множинний доступ з часовим розділенням каналів (TDMA), множинний доступ з несучою/попередженням колізій (CSMA/CA), множинний доступ з кодовим розділенням каналів (CDMA) і множинний доступ з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDMA). Через високі вимоги до пропускну здатності системи, в системах 5G використовується OFDMA. Системи 6G можуть використовувати ортогональний множинний доступ (OMA), як OFDMA, або неортогональний множинний доступ (NOMA). NOMA є однією з перспективних технологій множинного доступу. Він розглядався як одна зі схем множинного доступу 5G завдяки високій спектральній ефективності. Для того, щоб розмістити декілька користувачів на радіоресурсі, NOMA використовує як різні рівні потужності, так і різні коди для мультиплексування. У передавачі NOMA використовується суперпозиційне кодування для обслуговування декількох користувачів. У приймачі NOMA приймач з послідовним придушенням завад (SIC) може розділити декількох користувачів. Якщо технологія NOMA буде перевірена в практичних системах і досягне більш високого рівня технологічної готовності (TRL), наприклад, TRL 8 або 9, вона стане ключовою функцією систем 6G для підвищення пропускну здатності системи. Ще однією важливою особливістю канального рівня для систем 6G є автоматизація мережі, яка дозволяє стільниковій мережі стати більш інтелектуальною, підвищити економічну ефективність і створити індивідуальний сервіс для мобільних користувачів. Автоматизація мережі потребує декількох ключових функцій, таких як автоматичне забезпечення, конфігурація та оркестрування мережевих послуг. Розподіл ресурсів, як одна з

ключових функцій на каналному рівні, є частиною автоматичного забезпечення і може здійснюватися динамічно для різних запитів на радіоресурси з точки зору пропускнуої здатності і затримок, різної кількості користувачів і гетерогенних осередків. Ключовий внесок AI в каналний рівень 6G можна підсумувати наступним чином: розподіл і планування ресурсів на основі даних, адаптивний MAC-рівень з підтримкою AI, агрегація даних з підтримкою AI, виявлення збоїв системи з підтримкою AI, когнітивне радіо і ідентифікація MAC-адрес з підтримкою AI, виявлення перешкод з підтримкою AI, більш ефективний множинний доступ з використанням методів AI, оптимізація хендовера з використанням методів AI і так далі.

Розподіл та планування ресурсів на основі даних: Розподіл ресурсів, планування та розподіл живлення є ключовими функціями рівня MAC. Вони безпосередньо пов'язані з продуктивністю та ефективністю системи. Через високу складність проблему розподілу ресурсів, планування та розподілу потужності можна розбити на три окремі задачі. Кожне окреме рішення комбінується лінійно і виконується на базовій станції. Іноді розробляється спільне рішення, що враховує різні умови та вимоги до бездротової системи. Однак, воно все ще не є оптимальним, оскільки ми не можемо врахувати всі умови та вимоги бездротових систем. Спільне рішення може бути оптимальним лише за певних умов і вимог. Для вирішення складних оптимізаційних задач і пошуку оптимальних або субоптимальних рішень широко використовуються вичерпні та жадібні підходи. Методи штучного інтелекту допоможуть зменшити складність розподілу ресурсів та отримати глобальні оптимальні точки на основі даних. Вони дозволяють функції розподілу ресурсів мати здатність до навчання, адаптуватися та оптимізуватися для різних умов каналу. В CNN використовується для оптимізації розподілу ресурсів у стільникових мережах. CNN навчається шляхом спостереження за використанням радіоресурсу в певному сегменті мережі. Навчена CNN прогнозує необхідну пропускну здатність для розміщення майбутніх радіоресурсів, пов'язаних зі зрізами мережі. Мережа може досягти оптимального розподілу ресурсів.

Адаптивний MAC-рівень з підтримкою AI: Адаптивний MAC-рівень обговорювався в стандарті IEEE802.15. Адаптивний MAC-рівень можна розділити на три типи, такі як оцінка навантаження трафіку, адаптивний інтервал пробудження та адаптивний розподіл часових інтервалів. В

запропоновано адаптивний MAC-рівень з використанням дерев рішень. Реконфігурований MAC-шар може бути змінений під час виконання. Навчений MAC-рівень вибирає найбільш підходящий MAC-протокол з точки зору мережевих умов і додатків. Вибір MAC-протоколу є проблемою класифікації. Класифікатор навчається на основі статистики отриманого індикатора рівня сигналу (RSSI) і шаблонів трафіку через міжпакетний інтервал (PI) та вимог програми.

Агрегація даних з підтримкою AI: Агрегація даних - це метод збору та об'єднання корисних даних у бездротових мережах. Це ключова процедура для зменшення споживання енергії та використання мережевих ресурсів. Зокрема, це дуже корисно, коли кілька сенсорних вузлів виявляють однакові дані в мережах IoT. Ця проблема відома як проблема перекриття даних. В пропонується агрегація даних з використанням технології кластеризації для зменшення енергоспоживання та обчислювальної складності в бездротових сенсорних мережах. Методика кластеризації дозволяє вузлам формувати кластери, що фіксують схожі значення в межах певного порогу. Таким чином, дані лише одного датчика в кластері передаються на шлюз. Ми можемо зменшити кількість передач і значно підвищити енергоефективність.

Виявлення збоїв у роботі системи за допомогою AI: Проблема виявлення аномалій, включаючи ненормальну поведінку системи, може бути вирішена за допомогою алгоритмів AI. Коли ми маємо достатню кількість мічених і немічених даних, керований або некерований алгоритм може бути використаний для вирішення проблем класифікації або кластеризації, які можуть бути перетворені на проблеми виявлення аномалій. Існує багато прикладів, таких як переривання передачі, виявлення несправностей і виявлення вторгнень у бездротових системах. Атака типу "відмова в обслуговуванні" (DoS) призводить до вимкнення мережі через переповнення трафіку або надсилання певної інформації, що спричиняє збій. Легальні мобільні пристрої або сенсорні вузли Інтернету речей не можуть передавати свої пакети даних на базову станцію або шлюз. Бездротові системи можуть бути мішенню DoS-атак. Для захисту мережі від DoS-атак необхідно розробити безпечний MAC-рівень. У нейромережеві функції MAC-рівня відстежують зміни параметрів MAC-рівня, таких як частота колізій, середній час очікування MAC-атаки та частота надходження пакетів Request-To-Send (RTS). Якщо

варіації трафіку перевищують певний поріг, MAC-рівень розглядає це як аномальну поведінку. Навчена нейронна мережа виявляє DoS-атаки, і мережі тимчасово вимикаються. В нейронна мережа навчається шляхом онлайн навчання на сенсорних вузлах в бездротових сенсорних мережах. Алгоритм машини екстремального навчання використовується для класифікації збою системи, вторгнення та аномальної поведінки.



Рисунок 4.2 – Ключові функції когнітивного радіо на фізичному та MAC-рівні

Когнітивне радіо та ідентифікація MAC-адрес зі штучним інтелектом: Ефективність використання радіочастотного спектру є одним з ключових показників бездротових систем. Багато зацікавлених сторін хочуть більш ефективного використання спектру. Когнітивне радіо - це концепція більш ефективного використання радіочастотного спектру за рахунок інтелектуального виявлення порожнього спектру в каналах і використання вільного спектру, уникаючи при цьому будь-яких перешкод. Це дає нам можливість запобігти опортуністичному використанню спектру неліцензованими користувачами (або вторинними користувачами) там, де вони можуть створювати шкідливі перешкоди ліцензованим користувачам (або первинним користувачам). Рисунок 4.2 ілюструє ключові функції когнітивного радіо на фізичному рівні та рівні MAC.

На фізичному рівні когнітивного радіо здійснюється зондування спектра і передача даних. MAC-рівень когнітивного радіо включає зондування спектра, спільне використання, прийняття рішень і мобільність. Алгоритми штучного інтелекту будуть відігравати ключову роль у прийнятті рішень щодо спектру. Однак є багато недоліків. Наприклад, немає точного виявлення вільного

спектру без перешкод для ліцензованих користувачів. В основному, мобільні оператори з ліцензованим спектром очікують нульових перешкод від неліцензованих користувачів. Ця методика вимагає багатодіапазонної антени для пошуку. Якість обслуговування не може бути гарантована. Бездротовий канал може бути заглушений або прослуханий. Безпека не може бути гарантована. Таким чином, ця технологія вивчалася в академії, але не використовується в комерційних стільникових системах. Для того, щоб реалізувати когнітивне радіо, ключові питання можна підсумувати наступним чином: Як ми можемо точно визначити, що канал вільний або зайнятий? Які канали можна об'єднати в багатоканальних середовищах? Як довго ми використовуємо канал, що не працює, і як керувати багатоканальними завадами? Як підтримувати продуктивність нелімітованих користувачів? Алгоритми штучного інтелекту зможуть допомогти системам когнітивного радіо точно знаходити порожній слот спектра і передавати свої пакети відповідно до нього. Крім того, методи AI дозволяють ідентифікувати різні типи MAC-протоколів. Ця перевага дозволить підвищити пропускну здатність мережі. Наприклад, в проаналізовані часові особливості трьох різних мереж WiFi (802.11 b, g та n) на рівні MAC та проведено їх розрізнення за допомогою класифікатора KNN. У роботах для виявлення типів MAC-протоколів використовується CNN. Вони перетворюють дані у форму спектрограми і комбінують спектрограму і CNN для того, щоб ідентифікувати MAC-протоколи, такі як TDMA, CSMA/CA і ALOHA. Ще одним ключовим внеском алгоритмів ШІ в когнітивне радіо є прогнозування порожніх спектрів. Це допоможе більш ефективно використовувати спектр. Існує багато підходів до прогнозування використання спектру. Один з них полягає у вимірюванні використання каналу протягом певного часу і прогнозуванні майбутніх порожніх слотів спектру за допомогою RNN. Інший підхід полягає в спостереженні за якістю каналів з точки зору тривалості простою або зайнятості, а потім знаходженні найбільш підходящих каналів з гарною якістю. У нейронні мережі використовуються для прогнозування спектру. Нейронна мережа навчається на основі історії використання спектру, прогнозує використання спектру іншими сусідніми мережами та оптимізує використання спектру. В нейронна мережа прогнозує майбутню діяльність первинних користувачів на основі даних про зайнятість каналів у минулому та покращує

пропускну здатність вторинних користувачів, зменшуючи при цьому конфлікти між ними. У проблема вибору каналу розглядається як проблема бінарної класифікації. Алгоритми навчання, що не потребують спеціальних знань, такі як кластеризація K-середніх, не потребують інформації про канал від первинних користувачів та ідентифікують стан каналу. В навчання з підкріпленням застосовується до конфігурації доступу з підтримкою ліцензій (LAA). У базовій станції з LAA навчання з підкріпленням допомагає нам вибрати неліцензовану несучу і знайти відповідну тривалість передачі.

Виявлення перешкод за допомогою AI: У гетерогенних мережах 6G проблеми з перешкодами будуть серйозними і погіршуватимуть пропускну здатність мережі. Таким чином, виявлення перешкод і управління ними стане однією з ключових функцій 6G. На рівні MAC ми повинні мати можливість ідентифікувати канали і пакети з перешкодами і кількісно оцінювати перешкоди. Таким чином, ми зможемо знайти відповідні рішення для управління завадами. Наприклад, в MAC-рівень спостерігає за варіаціями енергії отриманого пакета і контролює показник якості зв'язку. Класифікатор на основі дерева рішень знаходить кандидатів і виявляє завади.

Більш ефективний множинний доступ з використанням методів AI: Методи AI можуть бути корисними для більш ефективної передачі даних завдяки навчанню на основі історії передачі даних в системі. Наприклад, CSMA/CA - це одна зі схем множинного доступу, заснована на визначенні несучої. Пристрої намагаються уникнути зіткнення. Вони можуть передавати свій пакет, коли канал порожній. Техніка уникнення колізій використовується для підвищення продуктивності передачі. Основний механізм полягає в наступному: Перед передачею пакету даних пристрої спостерігають за каналом, щоб визначити, чи не передають інші пристрої їхні пакети даних. Ми називаємо цей процес зондуванням несучої. Якщо канал зайнятий, пристрої чекають певний проміжок часу, а потім передають свій пакет даних. Експоненціальна затримка - це метод визначення того, як довго пристрої повинні чекати перед повторною передачею. Зазвичай, вони намагаються запитувати по експоненті, збільшуючи час очікування до максимального часу відставання. Коли колізію виявлено, виконується процес ретрансляції. Якщо ретрансляція відбувається часто, споживання енергії та затримка передачі збільшуються. Таким чином, важливо уникати колізій. CSMA/CA широко використовується в дротовому

зв'язку, але він прийнятий і в бездротових системах локальних мереж. Канальні характеристики бездротових систем значно відрізняються від дротових систем. Зокрема, потужність передачі, чутливість приймача, погіршення каналу і так далі. Існує проблема прихованих вузлів, оскільки пристрій не може добре виявити передачу інших пристроїв. Технології штучного інтелекту зможуть зменшити кількість ретрансляцій, передбачаючи відповідний часовий інтервал на основі історії зіткнень.

Оптимізація хендовера з використанням методів штучного інтелекту: Хендовер - це ключова функція стільникових мереж, яка повинна підтримувати середню пропускну здатність користувачів, мінімізуючи при цьому будь-які переривання обслуговування. У системах 6G буде більш важливим управління QoS в гетерогенних мережах. Гетерогенні мережі 6G будуть складатися з фемтостільників mmWAVE, макростільників, мереж IoT, надщільних мереж тощо. Таке мережеве середовище, як надщільні гетерогенні мережі, призведе до більш частих хендоверів, які можна визначити як зміну каналів і блоків ресурсів користувачами або об'єднання стільникових мереж при збереженні сеансу зв'язку. Задоволення цих нових вимог буде більш складним завданням для проектувальника мережі при розробці механізму хендовера 6G. Щільні мережі стануть ключовим типом міських стільникових мереж, де щільність базових станцій збільшується для підтримки високої пропускну здатності послуг для користувачів. Концепція малих стільників дозволяє нам сприяти розгортанню більшої кількості базових станцій. Вища мобільність мобільних пристроїв потребує більшої кількості хендоверів. Таким чином, в системах 6G потрібно частіше здійснювати хендовери. Як правило, існує обернено пропорційна залежність між середньою пропускну здатністю мобільних користувачів і кількістю хендоверів. Часті хендовери призводять до погіршення QoS в мережі. Під час хендоверів можуть відбуватися переривання обслуговування. Таким чином, основними дослідницькими завданнями в темі хендоверів є мінімізація кількості хендоверів між стільниками, зменшення переривань обслуговування або зменшення витрат на управління хендоверами. Методи штучного інтелекту будуть корисними для прогнозування переходу користувачів і підвищення продуктивності мережі. Вони відіграватимуть важливу роль в оптимізації хендоверів і виборі базової станції, зменшуючи кількість хендоверів, обчислювальну складність і затримки.

4.2 Алгоритм роботи каналів передавання мобільної мережі з використанням методів штучного інтелекту

Управління мобільністю бездротових мереж є однією з ключових функцій. Основна мета управління мобільністю - відстежити, де знаходяться користувачі, і надати їм послуги. Під час хендоверу можуть виникати переривання або затримки в роботі стільникових мереж. Ми повинні мінімізувати переривання або затримку. Зокрема, це буде критично важливо, коли ми надаватимемо користувачам послуги URLLC. У послугах URLLC час переривання мобільності (MIT), визначений стандартом 3GPP, повинен бути мінімізований, де MIT - це час, протягом якого мобільний користувач не може обмінюватися пакетами даних користувацького плану під час хендоверу. Під час хендоверу MIT TMIT визначається наступним чином:

$$T_{MIT} = (1 - P_{HOF})T_{HIT} + P_{HOF}T_{HOF}, \quad (4.1)$$

де THIT, THOF і PHOF позначають час переривання під час успішної передачі, час переривання при невдалій передачі та ймовірність невдалої передачі відповідно. У мережі LTE типовий THIT становить близько 50 мс, а THOF - близько 100 мс ~ 2 с. Таким чином, THOF має набагато більший вплив на TMIT. Це означає, що ми повинні мінімізувати PHOF. Рисунок 4.20 ілюструє загальний процес хендовера і процес хендовера на основі прогнозування в стільниковій мережі.

У поточному хендовері, як показано на рис. 9.20b, коли між двома базовими станціями (gNB) є зсув рівня сигналу (приблизно 1-3 дБ), починається процес хендоверу, що спричиняє затримку, наприклад, час запуску (TTT, приблизно 200-300 мс), тощо. Завдання управління мобільністю полягає в регулюванні цих параметрів для оптимізації процесу хендовера. Вони не залежать від швидкості мобільного пристрою, стану каналу, поширення сигналу, траєкторії руху користувача тощо. Для того, щоб мати більш персоналізований хендовер, системи 5G враховують більше параметрів мобільності. Використовуючи методи AI, хендовер на основі прогнозування, як показано на рис. 9.20c, дозволяє нам покращити ефективність хендовера,

навчаючись на даних середовища мобільності та оптимізуючи процес хендовера. Механізм хендовера з використанням AI дозволяє нам збирати рівні сигналів сусідніх стільників, прогнозувати ймовірність того, що один із сусідніх стільників має найкращий рівень сигналу, а потім приймати рішення про хендовер до стільника з найвищою ймовірністю.

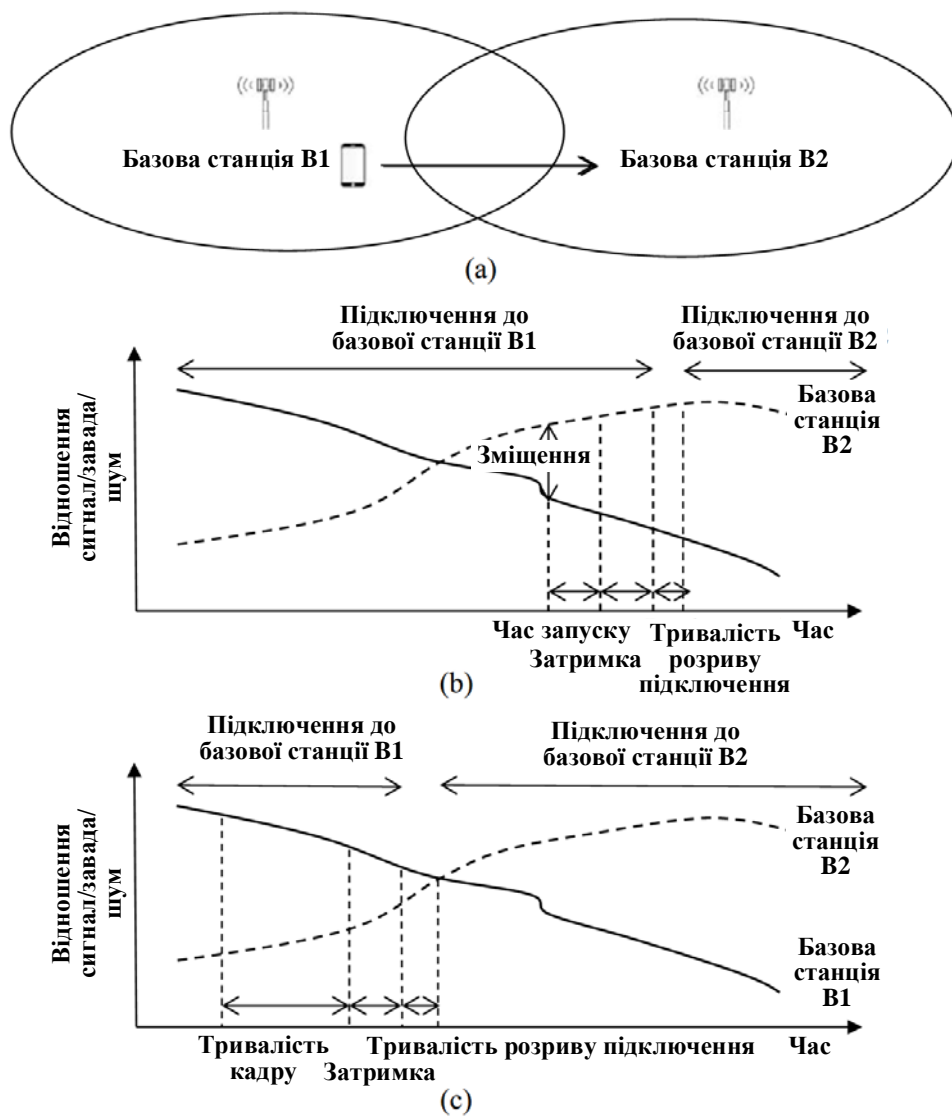


Рисунок 4.3 – Передача даних від gNB1 до gNB2 (a), поточний процес передачі даних (b) та процес передачі даних на основі прогнозування (c) у стільниковій мережі

Такі методи AI, як LSTM та класифікатор з керованим навчанням, можуть бути застосовані в цьому процесі. Це може забезпечити нам достатню адаптивність і низьку вартість управління, а також задовольнити вимоги 6G.

Навчання з підкріпленням може бути використано для покращення поточного механізму хендовера. У для пошуку оптимальної політики передачі даних, яка максимізує майбутню пропускну здатність в умовах пішохідного середовища, використовується Q-навчання. У рішення про перехід приймається за допомогою механізму навчання на основі даних про попередні переходи та внутрішніх даних між інформацією про транспортні засоби та остаточним рішенням про перехід. Проблема асоціації користувачів формулюється як неопукла оптимізаційна задача для балансування навантаження. Для вирішення проблеми застосовується глибоко детерміноване навчання з підкріпленням градієнту політики. Метод навчання полягає в тому, щоб асоціювати користувачів з різними траєкторіями з оптимальними базовими станціями, максимізуючи їх сумарну швидкість і зменшуючи кількість хендоверів. У роботі запропоновано спільну оптимізацію для мінімізації частоти хендоверів та максимізації пропускну здатності користувачів. Модель системи для задачі хендоверу та розподілу потужності розроблено як кооперативну мультиагентну задачу. Модель навчається централізовано після отримання децентралізованих політик. Оскільки ми коротко обговорили передачу з використанням методів AI, існує багато спроб застосувати методи AI для управління передачею. Всі вони дають нам значущі результати, а також нові підходи, але вони стикаються з багатьма дослідницькими проблемами, такими як збір належних навчальних даних, конфіденційність і безпека, процес в режимі реального часу, узагальнений механізм перенесення, накладні витрати на сигнал, балансування навантаження тощо. Зокрема, узагальнення є однією з найбільших дослідницьких проблем. Як ми вже обговорювали в першій частині, продуктивність методів AI значною мірою залежить від навчальних даних і умов. Навчена модель за певних умов, включаючи модель каналу, місцезнаходження користувача, кількість користувачів і конфігурацію мережі, не може бути такою ж, як тестовий набір даних у реальному світі. Таким чином, важливо переконатися, що навчальні дані, отримані з історії переходів користувачів, повинні представляти тестові дані для узагальнення моделі методів AI.

5 МЕРЕЖЕВИЙ РІВЕНЬ З ПІДТРИМКОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Для того, щоб досліджувати веб-сайти і спілкуватися з мобільними пристроями, ми повинні взаємодіяти між різними мережами. Завдання з'єднання між мережами виконуються на мережевому рівні. Основна функція традиційного мережевого рівня полягає у встановленні зв'язку між різними мережами шляхом пересилання мережевих пакетів даних до мережевих маршрутизаторів, які знаходять найкращий шлях між мережами. Він використовує, як правило, адреси Інтернет-протоколу (IP-адреси) для передачі їх до місця призначення і контролює роботу мереж. Маршрутизатори, як один з компонентів мережі, працюють на мережевому рівні для пересилання мережевих пакетів даних між різними мережами. Основні завдання мережевого рівня можна підсумувати наступним чином: пошук шляху для мережевих пакетів даних, перевірка працездатності мережевих компонентів в інших мережах, а також передача і прийом мережевих пакетів даних з інших мереж. Для виконання цих завдань мережевий рівень оснащений різними стеками протоколів для встановлення з'єднання, тестування, маршрутизації, шифрування тощо. Як ми вже обговорювали в першій частині, пошук оптимального шляху, класифікація даних і прогнозування даних є ключовими завданнями методів штучного інтелекту. Вони відповідають завданням мережевого рівня. Ми очікуємо, що методи ШІ покращать продуктивність мережевих рівнів. У цій главі ми обговоримо, як методи ШІ сприяють вирішенню завдань мережевого рівня, розглянемо системи стільникового зв'язку та мережі, а також дослідимо одну обрану тему про прогнозування мережевого трафіку в класичному підході та підході зі штучним інтелектом.

5.1 Особливості проектування мережевого рівня з використанням машинного навчання

Модель взаємодії відкритих систем (Open Systems Interconnection, OSI) - це концептуальна модель, що характеризує комунікаційні та мережеві функції для забезпечення сумісності різних комунікаційних і мережевих систем. Вона надає нам хороші орієнтири для розуміння телекомунікаційних і мережевих систем, але вона не ідеально відповідає стекам протоколів стільникових мереж.

Стеки протоколів 5G складаються з площини користувача і площини управління. Рівень управління відповідає за передачу сигналів або управління даними. У користувацькій площині відбувається обмін користувацькими даними. Такий поділ дозволяє мобільним операторам незалежно масштабувати свої функції і гнучко розгортати мережі. Стеки протоколів систем 5G успадковують базову структуру систем 4G. Стеки протоколів 6G можуть бути схожими на стеки протоколів 5G. У системах 5G механізм сигналізації спрощено для підтримки додатків URLLC. Орієнтовані на користувача протоколи дозволяють системі 5G підтримувати різні додатки. У системі 5G рівень 1 - це фізичний рівень. Рівень 2 включає MAC, RLC, PDCP і SDAP. Рівень 3 включає рівень управління радіоресурсами (RRC) і рівень недоступного доступу (NAS). На рисунку 5.1 показано рівні протоколу 5G для площини користувача і площини управління.

Рівень 3 - це не протокол площини користувача, а протокол площини управління. На рівні RRC мережі 5G налаштовують радіоресурси для встановлення з'єднань між мобільними пристроями і базовими станціями. Основна роль рівня RRC полягає в управлінні статусом з'єднання (з'єднання, очікування або неактивність) вузлових станцій наступного покоління (gNB) і користувацького обладнання (UE) шляхом налаштування значень конфігурації з точки зору статусу з'єднання. Функції рівня RRC можна підсумувати наступним чином: трансляція системної інформації рівня доступу (AS) і не доступу (NAS), пейджинг від NG-RAN або 5GC, встановлення, підтримка і звільнення RRC-з'єднання між UE і NG-RAN, функції безпеки і мобільності (управління ключами, хендовер і передача контексту, додавання і звільнення осередків і т.д.), звітність про вимірювання і управління UE, функції управління QoS і так далі. Основна роль рівня NAS полягає в управлінні сигналізацією між UE і опорною мережею (CN). Ключовими мережевими компонентами CN є функція управління доступом і мобільністю (AMF) і функція управління сеансами (SMF). На рівні NAS мережа 5G управляє мобільністю, надсилаючи сигнали до AMR. Вона встановлює сеанси зв'язку і підтримує безперервний зв'язок з UE, сигналізуючи SMF. У мережах 5G eNB співіснує з gNB протягом певного періоду і поступово замінюється на gNB. Вузли RAN підключаються до ядра мережі 5G (5GC), включаючи AMF, SMF і функцію користувацької площини. На рисунку 5.2 показано 5G NR RAN і GC.

Як ми бачимо на рис. 5.2, мережа наступного покоління RAN (NG-RAN) складається з gNB і ng-eNB (модернізована версія базової станції 4G LTE). 5G надає нам NFV, SDN, хмарні сервіси, розгалуження мережі тощо. Вони гнучкі та масштабовані, а також з'єднуються між собою через інтерфейс Xn і підключаються до AMF і UPF через інтерфейс NG. Ключовими функціями 5G є забезпечення підключення до Інтернету, забезпечення QoS в цьому з'єднанні, а також відстеження мобільності користувачів і використання для виставлення рахунків. Віртуалізація мережі є однією з ключових концепцій в системах 5G. 6G прискорить адаптацію концепції віртуалізації. У цьому підході до віртуалізації мережеві компоненти, такі як сервери, маршрутизатори та центри обробки даних, можуть бути віртуалізовані як програмні компоненти. Вони можуть бути з'єднані між географічно не пов'язаними мережевими компонентами. Це дозволяє гнучко масштабувати мережу і підвищувати її продуктивність та ефективність. Маршрутизатори систем 6G повинні бути гнучкими та економічно ефективними. Таким чином, віртуальна маршрутизація була однією з ключових дослідницьких задач вже давно. Віртуальний маршрутизатор був розроблений як програмна функція, яка може відтворювати апаратну маршрутизацію Інтернет-протоколу. Він є частиною віртуалізації мережевих функцій (NFV) і має більше переваг, таких як вища інтегруєбельність, гнучкість та економічна ефективність. Оскільки віртуальний маршрутизатор реалізований як програмне забезпечення, функції маршрутизації можуть бути вільно розміщені в мережах або центрах обробки даних, а також дозволяють динамічно конфігуруватися відповідно до вимог мережі або користувача. Можна розгорнути розподілені функції маршрутизації та керувати ними за допомогою централізованого плану управління. Мережі 5G повинні підтримувати численні та різноманітні потреби в різних вертикальних галузях, таких як охорона здоров'я, автомобільна промисловість, сільське господарство, автоматизація виробництва, енергетика і так далі. 5G запровадив концепцію "архітектури, заснованої на послугах", що базується на віртуалізації мережі. Нарізка мережі дозволяє мобільним операторам розгортати різні мережі з індивідуальними послугами додатків (eMBB, mMTC і URLLC) над загальною мережевою інфраструктурою. Кожен фрагмент мережі є ізольованим, а також пристосованим для задоволення вимог додатків. Зрізи мережі можна розглядати як набір віртуальних маршрутизаторів (або віртуальних машин) під єдиним

управлінням. Віртуалізація є ключовою концепцією мережевого розгалуження. Віртуалізовані мережі 5G підключаються до мережі передачі даних на основі IP, наприклад, до Інтернету. Мережа передачі даних на основі IP все ще відіграє важливу роль у мережі 5G і є загальним носієм для додатків 5G. Маршрутизація IP-пакетів виконується шляхом визначення найкращого шляху, що проходить через ряд апаратних або віртуальних маршрутизаторів.

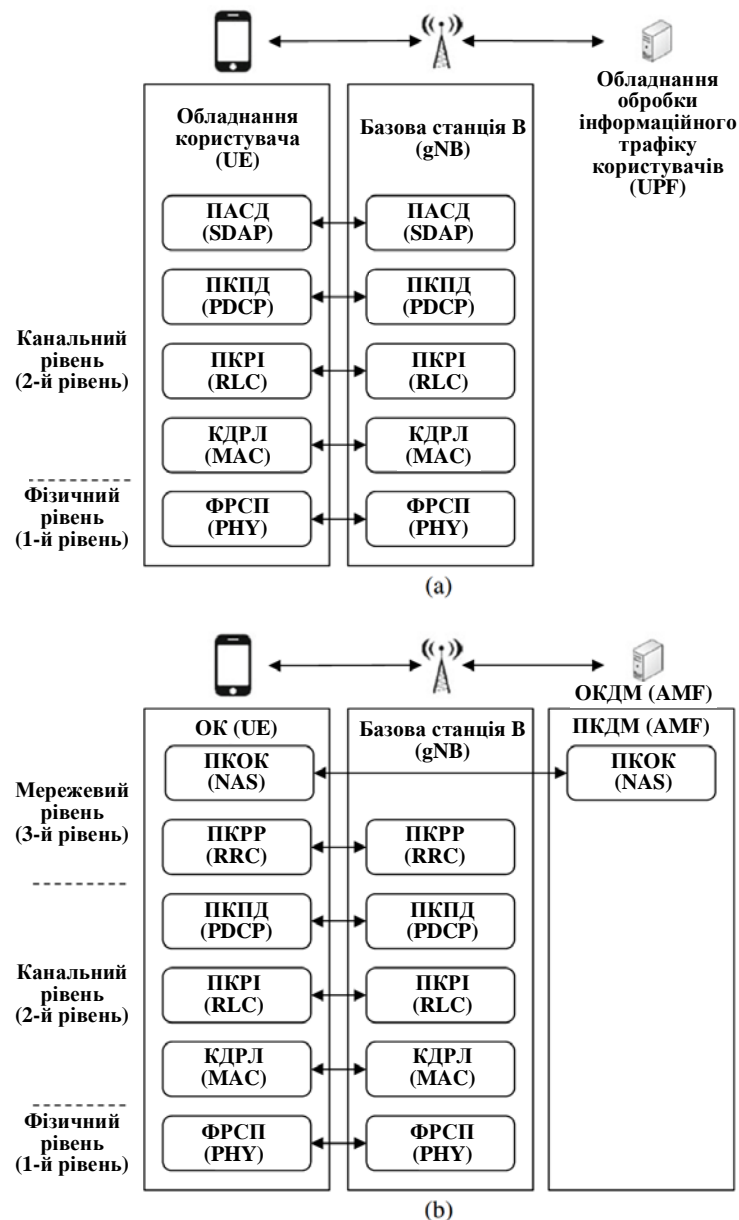


Рисунок 5.1 – Стеки протоколів 5G для площини користувача (a) і площини управління (b)

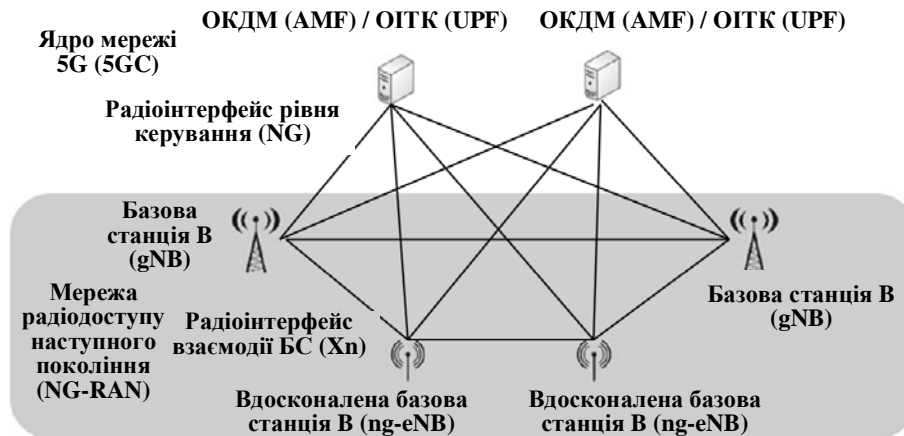


Рисунок 5.2 – 5G NR RAN і CN

Як ми вже обговорювали в першій частині, основний підхід методів AI полягає в тому, щоб використовувати приховані закономірності в навчальних даних і використовувати ці закономірності для групування, прогнозування або прийняття рішень у тестових даних. Безумовно, мережі 5G і 6G мають справу з величезною кількістю даних. Обчислювальні потужності та можливості зберігання в мережах 6G дозволяють нам навчати об'ємні дані і створювати нові додатки та сервіси для систем 6G. Що стосується мережевого рівня, то методи ШІ можуть аналізувати великі обсяги даних мережевого трафіку, оптимізувати конфігурації стільникових мереж і підвищувати їхню продуктивність. Сучасний підхід до проектування та управління стільниковими мережами базується на аналізі часових рядів та евристичних алгоритмах. Масштабувати мережу та відповідати вимогам складно. Оскільки стільникові мережі ускладнюються і впроваджуються нові послуги, необхідний новий підхід до проектування та управління мережею. Проектування та управління мережею з використанням ШІ дозволить досягти кращого проектування та управління мережею за рахунок визначення структури мережевого трафіку, прогнозування попиту та виявлення несправностей мережі. Процес проектування та управління мережами з використанням AI буде схожий на звичайний процес впровадження методів AI: Сформулювати проблему мережі, зібрати дані, навчити модель AI і застосувати навчену модель до проблеми. На етапі формулювання проблеми мережеві завдання класифікуються як пошук закономірностей, таких як кластеризація або класифікація і прогнозування майбутніх подій. Мережеві проблеми, які вирішуються методами AI, полягають у визначенні типу даних мережевого трафіку, вилученні особливостей

мережевих даних і прогнозуванні майбутніх обсягів трафіку або виявленні несправностей мережі. На етапі збору даних ми можемо використовувати історичні мережеві дані в режимі офлайн або мережеві дані в режимі реального часу в режимі онлайн. На практиці ми можемо зібрати набір даних за допомогою інструментів з відкритим вихідним кодом (наприклад, `tshark`, `tcpdump`), комерційних інструментів або налаштування мережеских компонентів (наприклад, моніторинг потоку). Типи мережеских даних - це потік даних, захоплення пакетів, дані журналів, телеметрія, конфігурації мережеских компонентів, дані про топологію мережі тощо. Використовуючи ці дані, можна витягти характеристики. Наприклад, характеристиками потоку можуть бути тривалість потоку, кількість пакетів у потоці, обсяг даних у потоці тощо. Характеристиками пакетів може бути статистична інформація, така як середнє значення, дисперсія, середньоквадратичне відхилення тощо. Іншими характеристиками є пропускна здатність, час сеансу, розмір вікна TCP тощо. Вилучення характеристик може бути виконано людьми, які мають досвід у цій галузі. На етапі навчання навчальні та тестові набори даних зазвичай розподіляються у співвідношенні 80:20 або 70:30. Методи AI можуть бути реалізовані за допомогою платформи ШІ, такої як Keras, Tensorflow або PyTorch, або ж розробники мереж можуть розробити власні методи для конкретної проблеми. Методи AI слід навчати, зберігаючи просторову та часову різноманітність між наборами даних. Навчену модель слід оцінювати з точки зору точності, складності, надійності та стабільності. Зокрема, точність є важливою метрикою, і її слід оцінювати як різницю між фактичними значеннями і прогнозом. Якщо ми маємо добре навчену модель, мережеву проблему можна вирішити ефективно. Ключові внески AI в мережевий рівень 6G можна підсумувати наступним чином: Внесок AI в прогнозування мережевого трафіку, класифікація мережевого трафіку за допомогою алгоритмів AI, оптимальний шлях маршрутизації за допомогою алгоритмів AI, управління чергами за допомогою алгоритмів AI, внесок AI в управління несправностями мережі та управління QoS за допомогою алгоритмів AI.

Внесок AI у прогнозування мережевого трафіку: Метою прогнозування мережевого трафіку є передбачення характеристик наступного мережевого трафіку на основі даних про попередній мережевий трафік. Цей метод відіграє важливу роль в експлуатації та управлінні мережею в гетерогенних мережах

6G. Результати прогнозування мережевого трафіку можуть бути використані для моніторингу мережі, управління ресурсами, виявлення несправностей тощо. Традиційний підхід до прогнозування часових рядів базується на регресійній моделі для пошуку кореляції між минулими даними про трафік та майбутніми даними про трафік. Для прогнозування часових рядів широко використовується модель авторегресійного інтегрованого ковзного середнього (ARIMA). Вона є узагальненням авторегресійного ковзного середнього шляхом додавання поняття інтеграції. Для стаціонарних часових рядів інтеграція зазвичай використовує віднімання між спостереженням на поточному часовому кроці та спостереженням на попередньому часовому кроці. Таким чином, ARIMA має часову структуру і надає нам простий, але потужний інструмент для аналізу та прогнозування даних часових рядів. Однак, оскільки складність мережі та обсяги трафіку зростають, а також мережеві оператори вимагають зменшення накладних витрат на передачу пакетів, методи штучного інтелекту стають важливим методом для прогнозування часових рядів мережевого трафіку. Проблему прогнозування мережевого трафіку можна розглядати як проблему аналізу часових рядів. Мережевий трафік варіюється з точки зору вимог користувачів, конфігурацій системи, додатків тощо. Нейронна мережа використовується для підвищення точності методів авторегресії. Різні типи нейронних мереж застосовуються для задач аналізу часових рядів. Запропоновано прогнозування пропускну здатності на заданому шляху з використанням нейронних мереж для грід-середовища. Ансамбль нейронних мереж застосовується для прогнозування в реальному часі та порівнюється з авторегресійними моделями. З ними порівнюється затримка та обчислювальна складність. Показано, що ансамбль нейронних мереж є більш придатним для прогнозування в реальному часі. Запропоновано гібридний алгоритм навчання, що поєднує алгоритм штучної бджолоїної колонії (ABC) та оптимізацію рою частинок (PSO) як алгоритм еволюційного пошуку. Вони реалізовані за допомогою нейронної мережі. Поєднання ABC та PSO забезпечує швидший час навчання. В роботі досліджується прогнозування трафіку міжмережових центрів обробки даних. Вони зосереджуються на прогнозуванні обсягу вхідного та вихідного трафіку, в якому домінують слонові потоки, на відміну від прогнозування часових рядів, де слонові потоки є надзвичайно великими безперервними потоками. Слонові потоки можуть займати незбалансовану

частку пропускної здатності протягом певного періоду. Як правило, вони займають щонайменше 10% загальної пропускної здатності і 10% найдовших активних потоків. Таким чином, вони повинні бути виявлені та керовані для забезпечення балансу трафіку. Нейронна мережа з простим градієнтним спуском використовується для фіксації особливостей трафіку в часі та частоті. В роботі для прогнозування розміру транспортного потоку та виявлення потоку слонів використовується регресія гауссових процесів, онлайн узгодження байєсівських моментів та нейронна мережа. Проблема була сформульована як онлайн машинне навчання для адаптації до змін транспортного потоку. Ці спроби дають нам значущу точність мережевого прогнозування трафіку. Нейронна мережа корисна для прогнозування обсягів трафіку на основі минулих даних, але зменшення складності все ще залишається складним завданням. Крім того, прогнозування часових рядів спирається на минулі спостереження. Якщо ми не можемо виміряти достатню кількість минулих даних у високошвидкісному потоці, точність прогнозування мережевого трафіку не може бути гарантована. Таким чином, досягнення хорошого балансу між точністю, обчислювальною складністю і затримкою все ще залишається важливою темою. У Розділі 5.3 ми обговоримо класичне прогнозування мережевого трафіку та прогнозування мережевого трафіку на основі RNN.

Класифікація мережевого трафіку за допомогою алгоритмів AI: Мережеві оператори зазвичай класифікують тип мережевого трафіку на чутливий трафік, трафік з максимальними зусиллями та небажаний трафік. Чутливий трафік - це чутливий до часу трафік, включаючи VoIP, телеконференції, онлайн-ігри тощо. Оператори мережі можуть надавати пріоритет чутливому трафіку і гарантувати якість обслуговування. Трафік максимальних зусиль - це не чутливий і не шкідливий трафік, включаючи електронну пошту тощо. Небажаний трафік - це шкідливий трафік, включаючи спам, зловмисні атаки тощо. Оператори мережі повинні блокувати цей тип трафіку. Іноді виділяють трафік, критичний до затримок, трафік, орієнтований на додатки, та інші. Залежно від класифікації пакетів, до трафіку можна застосувати заздалегідь визначену мережеву політику і надати користувачам належні послуги. Класифікація даних є одним з ключових застосувань методів AI, як ми обговорювали в частині I. Класифікація мережевого трафіку відповідає роботі, яку може виконати

алгоритм AI. Класифікація мережевого трафіку з використанням методів AI широко вивчається. Класифікація мережевого трафіку є основою для ідентифікації типів трафіку додатків і дозволяє формувати трафік і контролювати його в мережі. Мобільні та мережеві оператори потребують класифікації мережевого трафіку для моніторингу продуктивності, виділення ресурсів, управління QoS, управління пропускнуою спроможністю тощо. Зокрема, визначення пріоритетів мережевого трафіку буде одним з важливих завдань в системах 6G. Якщо мережеві оператори зможуть ідентифікувати мережевий трафік і класифікувати його на критичні до затримок або звичайні додатки, можна буде надавати користувачам пріоритетні послуги і досягти більш ефективного управління ресурсами. Традиційний метод класифікації мережевого трафіку можна підсумувати як заснований на номерах портів, на корисному навантаженні пакетів, на поведінці хостів та на статистиці потоку. Традиційний підхід, такий як використання номерів портів, може бути неефективним у системах 6G через використання динамічного узгодження портів, тунелювання тощо. Методи класифікації трафіку на основі AI будуть більш корисними для складних мережевих систем. Класифікація мережевого трафіку на основі корисного навантаження використовує інформацію про корисне навантаження додатків, виключаючи інформацію про заголовки пакетів мережевого трафіку. Класифікація трафіку на основі корисного навантаження пакетів повинна шукати шаблони додатків у корисному навантаженні пакетів і вимагає високої обчислювальної складності та великого обсягу пам'яті. Цей спосіб не є ефективним, якщо пакети мають динамічну поведінку або зашифровані. У роботі для класифікації трафіку на основі корисного навантаження використовується техніка кластеризації AI. Класифікатор навчається на основі списку частково корельованих протоколів, які моделюються розподілом сеансів. Агломеративна ієрархічна кластеризація виконується для кластеризації протоколів та їх розрізнення. Класифікація мережевого трафіку на основі поведінки хоста базується на притаманній хосту поведінці. Залежно від додатків, що генеруються різними сигналами зв'язку, вона досліджує мережевий трафік між хостами і є корисною, коли є незареєстровані номери портів і зашифроване корисне навантаження. Наприклад, одноранговий хост і веб-сервер поведуться по-різному. Для класифікації використовується таблиця пар (IP-адреса, номери портів) для

кожного потоку. Цей підхід корисний для виявлення некласифікованих потоків. Класифікатор SVM використовує функцію маси ймовірності від кількості однорангових хостів і навчається знаходити шаблони однорангових додатків. Однак точність класифікації мережевого трафіку на основі поведінки хоста залежить від місця розташування системи моніторингу. Класифікація трафіку на основі статистики потоку базується на спостереженнях за повними потоками. Повний потік - це односпрямований обмін послідовними пакетами в мережі між портом за IP-адресою та іншим портом за іншою IP-адресою з використанням певного прикладного протоколу. Підпотік є підмножиною повного потоку і може бути зібраний протягом часового вікна в поточному сеансі. Таким чином, повний потік містить інформацію про налаштування сеансу, передачу даних та завершення сеансу. Класифікація трафіку на основі статистики потоку базується на таких характеристиках потоку, як довжина пакетів, тривалість потоку, кількість пакетів тощо, і використовує ці характеристики трафіку, що генерується різними додатками. У системах 5G застосовується віртуалізація мережевих функцій (NFV), яка робить мережу гнучкою і масштабованою. Це підводить нас до ще одного дослідницького виклику. Оскільки тип трафіку може змінюватися в мережах на основі NFV, точність класифікаторів може суттєво відрізнятись. Для класифікації мережевого трафіку пропонується система навчання на основі трафіку на основі NFV. Фреймворк містить контролер, набір класифікаторів машинного навчання та колектори ознак як віртуальні мережеві функції. Фреймворк розроблено з метою досягнення балансу між точністю та швидкістю. Оскільки вилучення різних ознак відрізняється один від одного, ми повинні зробити два важливих кроки: ідентифікацію колекції ознак на площині даних або площині управління та централізоване представлення мережевих ресурсів. Контролер повинен підтримувати модель машинного навчання, навчену в автономному режимі, і вибрати найбільш підходящі класифікатор і ознаки потоку. Контролер обирає ефективні класифікатори машинного навчання та налаштовує економічно ефективні функції потоку для протоколу потоку, такого як TCP, UDP та інші. Процедура класифікації трафіку на основі машинного навчання, як показано на рисунку 5.3.

На першому етапі збираються вибірки трафіку, виділяються статистичні ознаки, а потім вибірки маркуються відповідним класом. На другому кроці

статистичні ознаки масштабуються. На третьому етапі навчається модель машинного навчання та оцінюються тестові дані. На останньому етапі вимірюються такі показники, як точність та інші. Існують й інші системи класифікації трафіку, що використовують машинне навчання. Їхні підходи схожі на рис. 5.3. У системах 6G широко використовуватимуться NFV і SDN, які забезпечать нам більшу гнучкість і ефективність мережі. У динамічному і зашифрованому мережевому середовищі методи AI зроблять значний внесок у підвищення ефективності класифікації мережевого трафіку.

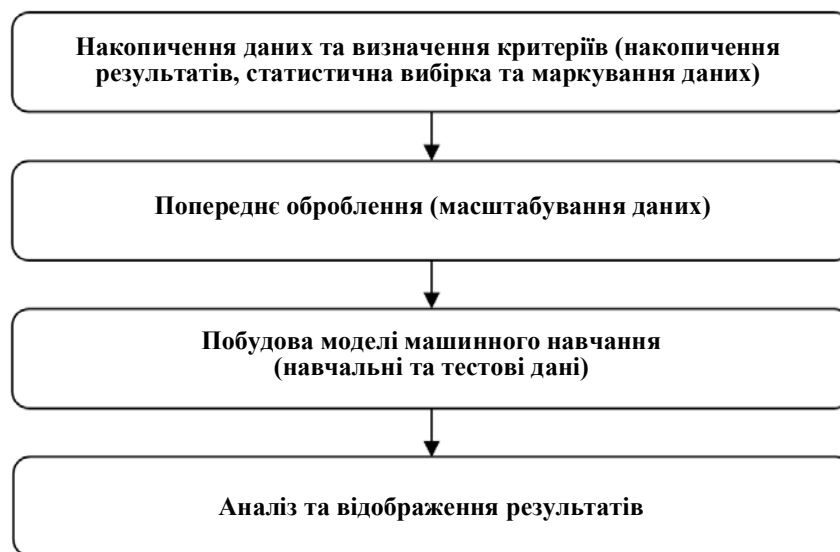


Рисунок 5.3 – Чотириступенева класифікація трафіку на основі машинного навчання

Оптимальний шлях маршрутизації за допомогою алгоритмів AI: Пошук оптимального шляху маршрутизації та передача пакета даних оптимальним шляхом є фундаментальною задачею в мережі. Ефективна маршрутизація вимагає відповідних політик, які можуть адаптуватися до динамічно мінливих мереж з точки зору навантаження трафіку, структури трафіку, топології мережі тощо. Вони залежать від мережевої політики та операційних цілей з точки зору вартості, пропускної здатності, затримок, забезпечення QoS і так далі. Методи маршрутизації відіграють важливу роль в обміні пакетами, щоб уникнути заторів і затримок. Методи AI, такі як навчання з підкріпленням, добре поєднуються з проблемою пошуку шляху.

У поточному механізмі навчання з підкріпленням для задачі маршрутизації ми можемо застосовувати розподілений або централізований спосіб. При розподіленому способі кожен вузол маршрутизації, як агент, приймає локальні рішення з навколишнього середовища самостійно або спільно. Це дозволяє нам керувати трафіком в режимі реального часу. При централізованому способі контролер керує процесом навчання з підкріпленням і дозволяє уникнути потоку слонів або заторів. Однак це може призвести до затримки маршрутизації. Крім того, залежно від вимог мережі, навчання з підкріпленням оцінює різні політики маршрутизації на основі функції корисності мережі як винагороду. Функціями корисності можуть бути балансування навантаження, QoS, пропускна здатність, затримка і так далі. При заданих мережевих обмеженнях ми повинні знайти хороший компроміс між вигодами і жертвами.

Управління чергою за допомогою алгоритмів штучного інтелекту: Загалом, управління чергою - це процес мінімізації часу очікування користувача. У мережі черга - це сукупність пакетів, які очікують на передачу мережевими компонентами. Мережеві оператори хочуть згладити наплив пакетів, що надходять, і збільшити використання мережі. З точки зору мережевих маршрутизаторів і комутаторів, традиційне управління чергою - це відкидання сліду, яке використовується мережевими планувальниками для прийняття рішення про те, коли пакети будуть відкинуті. На основі принципу "першим прийшов - першим пішов" (FIFO) кожна черга має максимальну довжину для прийому вхідних пакетів. Якщо буфер заповнений, наступні вхідні пакети відкидаються, поки він не буде знову доступний. Однак цей підхід спричиняє багато проблем, таких як неефективне використання мережі, довга затримка в черзі, якщо буфер постійно заповнений, несправедливість тощо. Активне управління чергою (AQM) - це політика скидання пакетів у буфер до того, як буфер буде заповнений. Таким чином, основною метою є контроль середньої затримки в черзі, зменшення перевантаження мережі та підтримка високої завантаженості мережі. Крім того, управління чергою має на меті покращити справедливий розподіл мережевих ресурсів, зменшити непотрібне скидання пакетів і впоратися з транзитними перевантаженнями. Випадкове раннє виявлення (RED) - це один з відомих методів активного управління чергою, який полягає у випадковому відкиданні або маркуванні пакетів зі

зростаючою ймовірністю до того, як буфер буде заповнений. Випадкове раннє виявлення також відоме як випадкове раннє відкидання або скидання. Це дає нам такі переваги, як менша середня затримка в черзі, десинхронізація співіснуючих потоків та інші. Основною метою є підтримка середнього розміру черги шляхом встановлення максимального та мінімального розміру черги в часи нормальних заторів. На практиці алгоритм дуже чутливий до заданих параметрів, і знайти відповідні параметри дуже складно. Для вирішення цих проблем було розроблено багато методів AQM. Однак вони залежать від фіксованих параметрів, які не є чутливими до мінливих умов мережі. Методи AI можуть бути застосовані для поліпшення методів AQM. Вони здатні керувати чергою та параметрами мережевого трафіку. Розроблено предиктивний AQM з використанням прогнозування майбутнього обсягу трафіку. Їх підхід залежить від нормованого найменшого середнього квадрата для обчислення лінійної мінімальної середньоквадратичної помилки. Контролер на основі LMMSE досягає хорошої точності для підвищення стабільності довжини черги. Використовуючи прогнози, він коригує ймовірність втрати пакетів і забезпечує високу завантаженість каналу, зберігаючи при цьому низьку втрату пакетів. Розроблено метод AQM на основі пропорційно-інтегрально-похідного (PI) регулятора. PID-регулятор використовує адаптивний нейрон для зміни параметрів. Він може регулювати довжину черги при заданій меті і показує кращу продуктивність, ніж звичайні методи AQM. Підсумовуючи, можна сказати, що традиційні схеми управління чергами не можуть забезпечити достатню продуктивність в умовах нелінійного мережевого середовища, що змінюється в часі. Таким чином, внесок AI в управління чергами дає нам нову можливість для кращої стабілізації довжини черги. Зокрема, здатність AI передбачати майбутнє значення буде корисною для коригування ймовірності втрати пакетів.

Внесок штучного інтелекту в управління мережевими несправностями: В управлінні мережею управління несправностями - це компонент мережевих функцій, пов'язаний з виявленням, ізоляцією та збором несправностей. Оператори мережі повинні мати достатньо знань про всю мережу, спостерігати за проблемами мережі, аналізувати ситуацію, вирішувати проблеми, а потім реєструвати помилки. Оскільки управління несправностями підвищує надійність і доступність мережі, воно стає все більш важливим для управління

складними мережами, а також стикається з більш складними проблемами через віртуалізацію, динамічність і гетерогенність мережі. Основний процес управління несправностями можна підсумувати наступним чином:

- 1) виявлення несправностей для визначення того, чи виникають несправності в мережі,
- 2) ізоляція першопричин несправностей,
- 3) сповіщення адміністраторів
- 4) усунення проблеми.

На додаток до цього можна додати прогнозування несправностей. Цей крок може запобігти майбутнім несправностям, передбачаючи їх і швидко реагуючи, щоб мінімізувати погіршення продуктивності. Всі методи відіграватимуть важливу роль в управлінні несправностями, особливо прогнозування несправностей. Прогнозування несправностей з використанням підходів машинного навчання розроблено шляхом безперервного вивчення різниці між нормальною та аномальною поведінкою мережі. Безперервне навчання дозволяє прогнозуванню та діагностиці несправностей мати справу з мережею, що постійно змінюється, без явного контролю. У роботі розроблено виявлення несправностей для стільникових систем для пошуку несправностей на різних базових станціях, секторах, несучих і каналах. Виявлення несправностей охоплює класифікацію несправностей з використанням мережевих симптомів, деградацію продуктивності та інші. Вони використовують статистичну гіпотезу для перевірки фреймворку, що поєднує параметричні та непараметричні тестові статистики, а потім моделюють поведінку. У параметричних статистичних тестах спостерігаються значні відхилення від очікуваного і виявляється несправність. У непараметричних статистичних тестах проводиться перевірка гіпотез, що поєднує емпіричні дані та статистичні кореляції, коли очікуваний розподіл невідомий. У роботі розроблено метод виявлення несправностей у бездротовій сенсорній мережі з використанням рекурентної нейронної мережі (RNN). Вузли прихованих шарів у RNN моделюють вузли датчиків у бездротовій сенсорній мережі. Ваги базуються на коефіцієнтах достовірності отриманих показників рівня сигналу. На виході отримується апроксимація роботи бездротової сенсорної мережі. Виявлення несправностей відбувається за розбіжностями між апроксимацією та реальними значеннями бездротової сенсорної мережі. RNN може успішно

виявляти несправності для бездротових сенсорних мереж невеликого розміру. Дерево рішень використовується для діагностики несправностей на великих інтернет-сайтах. Дерева рішень навчаються на трасах запитів за періоди часу, коли відбувалися збої в роботі користувачів. Шляхи через дерево рішень ранжуються за ступенем їх кореляції зі збоями, а вузли об'єднуються з точки зору спостережуваного часткового порядку компонентів. Для скорочення часу збіжності використовується критерій ранньої зупинки, а також алгоритм навчання слідує найбільш підозрілим шляхом у дереві рішень. При застосуванні методів AI для управління несправностями однією з важливих дослідницьких проблем є брак даних про несправності в мережі. Як ми вже обговорювали в першій частині, ефективність методів AI залежить від набору навчальних даних. Якщо даних про несправності недостатньо, точність методів AI буде низькою.

Управління QoS за допомогою алгоритмів штучного інтелекту: Управління якістю обслуговування (QoS) безпосередньо пов'язане з користувацьким досвідом. Ключовими показниками QoS є пропускна здатність, час проходження в обидва кінці, джиттер, втрата пакетів і частота помилок. Вимірювання QoS мережі здійснюється за допомогою даних системи управління мережею. Якість експлуатації (QoE) - це показник загальної задоволеності користувачів. QoE відрізняється від QoS. QoE фокусується на фактичному користувацькому досвіді. Для оцінки якості медіа на основі думки користувача широко використовується показник середньої оцінки (MOS). У мережах MOS - це рейтингова метрика якості голосу або відео. Зазвичай користувачі можуть оцінити медіа від 1 (погано) до 5 (відмінно). Оцінки усереднюються. Залежно від цих показників, рівень QoS може бути визначений як успіх, деградація або відмова послуги. Функції управління QoS повинні контролювати параметри QoS для забезпечення високої якості послуг. Вони повинні гарантувати на певному рівні запуск додатків в умовах обмежених мережевих ресурсів. Ми повинні визначити межі і пріоритети для різних потоків даних і призначити різним типам мережевих потоків даних різні рівні пріоритету. Наприклад, якщо передача даних є критично важливою за часом, мережеві оператори повинні ідентифікувати додатки і надавати їм вищий пріоритет у мережевих потоках.

Таблиця 5.1 – підсумовує внесок AI у вирішення деяких мережевих проблем та додатків

Мережа проблеми та додатки	Цілі	Набір даних	Традиційний підхід	Методи ШІ
Мережевий трафік прогноз	Оцініть обсяг трафіку і контролюйте перевантаження	Потік або пакет даних зі статистичною інформацією, такою як кількість пакетів	ARIMA	Контрольоване learning, Deep навчання
Мережевий трафік класифікація	Ідентифікація додатки та сервісів	Потік або пакет даних з маркованими класами додатків	Порт або на основі корисного навантаження метод	Контрольоване навчання, Глибоке навчання
Оптимальний шлях маршрутизації	Знайти оптимальний шлях маршрутизації	Дані журналу	Теорія графів	Підкріплення навчання
Черга управління	Контроль перевантаження	Потік або пакет даних зі статистичною інформацією	AQM	Контрольоване навчання, Глибоке навчання
Несправність мережі управління	Безпека, мережа усунення несправностей	Потокові дані, заголовки пакетів заголовки, телеметрія дані, дані журналів	Пороговий або заснований на правилах метод, на основі підпису метод, Ручне виявлення	Неконтрольоване навчання, Контрольоване навчання
QoS управління	Гарантуйте якість обслуговування	Потокові дані, пакетні дані, дані журналу	Ручне управління, Пороговий або метод на основі правил	Контрольоване навчання, Глибоке навчання

Одним із традиційних способів гарантування QoS мережі є маркування пакетів даних за типами послуг, створення окремих черг для послуг,

призначення їм пріоритетів, а потім резервування мережевого ресурсу для критично важливих додатків або інших. Для моделювання кореляції QoS та QoE використовуються класифікатори машинного навчання, такі як Naive Bayes, SVM, KNN, дерево рішень, випадковий ліс та нейронна мережа. За допомогою мережевого емулятора генеруються потоки відеотрафіку з різними затримками, джиттером і втратами пакетів. Обчислюються MOS. Проводиться перехресна перевірка для оцінки класифікаторів машинного навчання. Дерево рішень і випадковий ліс забезпечують дещо кращу продуктивність, ніж інші, з точки зору середньої абсолютної похибки. Глибоке навчання застосовується для оцінювання якості потокового відео в реальному часі. Для мереж загального стану та мереж з дуже великими втратами оцінюється метод їх оцінки та вивчається вплив стану мережі.

У дослідженні затримка, джиттер і пропускна здатність розглядаються як незалежні умови, але ці погіршення пов'язані між собою. Одним з важливих дослідницьких підходів у цій галузі є прогнозування QoS або QoE. Для різних типів медіа були розроблені різні інструменти оцінки з використанням методів штучного інтелекту. Крім того, оскільки бракує кількісного виміру мережевого QoS і QoE, багато дослідницьких груп вивчають можливості застосування методів AI для точного вимірювання QoS і QoE та створення нової метрики або ефективної методології для них.

5.2 Розрахунок структури мобільної системи та топології радіомережі

Стільникова мережа (також звана мобільною мережею) - це скупчення наземних ділянок, які називаються стільниками. Соти як географічні області включають базові станції з прийомопередавачами і підключені до голосових мереж, таких як телефонна мережа загального користування (ТфОП), або мереж передачі даних, таких як Інтернет. У мережах 1G і 2G стільникового зв'язку основною метою було забезпечення зв'язку за допомогою голосових дзвінків, а самі мережі підключалися до мережі з комутацією каналів. Однак, стрімке зростання Інтернету змушує стільникові мережі підтримувати послугу передачі даних. У мережах 3G передача даних стає головною метою. Починаючи з мереж 4G, мережі з комутацією каналів замінюються мережами з комутацією пакетів на основі IP. Основна відмінність полягає в тому, що

мережа з комутацією каналів орієнтована на з'єднання, а мережа з комутацією пакетів - на відсутність з'єднань. Оскільки комутація пакетів є більш доступною та ефективною, ніж комутація каналів, мережі з комутацією пакетів стають мережею передачі даних. У мережах з комутацією пакетів дані розбиваються на пакети для більш ефективної передачі, і пакети повинні знаходити власні маршрути передачі даних до місця призначення. На рисунку 5.4 показано порівняння мережі з комутацією каналів і мережі з комутацією пакетів.

На рисунку 5.4 показано концептуальну схему підключення стільникової мережі до Інтернету та телефонної мережі. Це фундаментальна мережева архітектура стільникових систем. Стільникова система 1G надає мобільним користувачам тільки голосовий зв'язок і має просту мережеву архітектуру.

Як ми бачимо на рисунку 5.5, географічна територія поділена на стільники з базовими станціями. Мобільний комутаційний центр (MSC) управляє базовими станціями і слугує шлюзом до магістральних мереж, таких як ТфОП, цифрова мережа з інтегрованими послугами (ISTN) та Інтернет. Загалом, базова станція, розташована в центрі кожної комірки, оснащена антеною, контролером і прийомопередавачами. Кожна базова станція визначає одну комірку. Контролер резервує частотні діапазони, контролює пейджинг і хендовер між базовими станціями, а також керує процесом дзвінків між мобільними пристроями та іншими компонентами мережі. До базової станції підключено декілька мобільних пристроїв, які можуть переміщатися всередині комірки або переходити до сусідніх комірок. Існує два типи каналів: канали управління (або площина управління) і канали трафіку (або площина користувача). За допомогою каналів управління встановлюється з'єднання між мобільними пристроями та мережею, а також здійснюється управління встановленням з'єднання та підтриманням зв'язку. Канал трафіку забезпечує передачу даних користувача. MSC управляє дзвінками між мобільними пристроями і встановлює з'єднання між фіксованими користувачами з ТфОП і мобільними користувачами з мережами стільникового зв'язку. Крім того, він призначає канали стільникам, управляє хендовери, відстежує з'єднання, трафік і так далі. MSC містить реєстр місцезнаходження відвідувачів (VLR) та реєстр місцезнаходження будинків (HLR). HLR - це основна база даних, де зберігається інформація про користувачів. VLR зберігає інформацію про відвідувачів з HLR, коли вони переміщуються в інше місце. HLR керує

автентифікацією за допомогою центру автентифікації (AuC) з ключами шифрування. Коли ініціюється дзвінок, HLR перевіряє справжнього мобільного користувача за допомогою дійсного міжнародного ідентифікатора мобільного обладнання (IMEI), після чого між користувачами встановлюється зв'язок.

У міру розвитку стільникових мереж від 1G до 5G в них постійно з'являються нові функції та додаткові можливості, а структура мережі змінюється. У 1973 році Мартін Купер і Джон Ф. Мітчелл з компанії Motorola продемонстрували перший публічний дзвінок по мобільному телефону. Аналогова система 1G заклала основу стільникових мереж і застосувала такі ключові технології, як повторне використання частот, ліцензований спектр тощо. Однак, система 1G мала обмежену пропускну здатність, оскільки система FDMA є неефективною. FDMA систем 1G підтримує лише 1 користувача на канал. У 1991 році у Фінляндії було комерційно запущено систему 2G стільникового зв'язку.

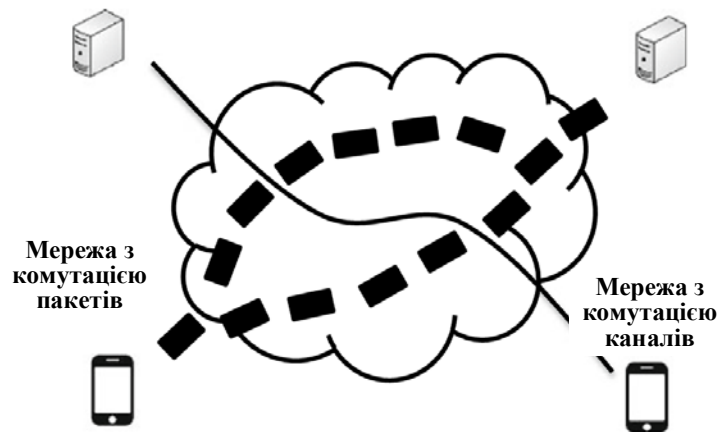


Рисунок 5.4 – Приклад мережі з комутацією каналів та мережі з комутацією пакетів

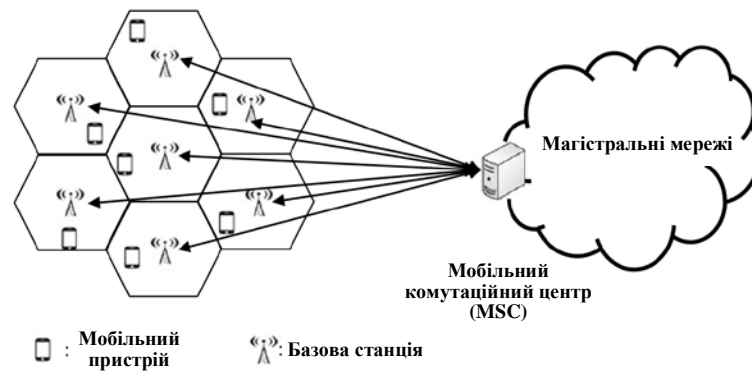


Рисунок 5.5 – Концептуальна схема підключення стільникової мережі до Інтернету та телефонної мережі

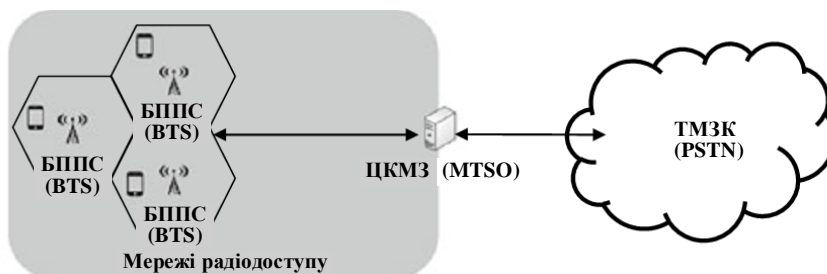
Системи 2G можна розділити на глобальну систему мобільного зв'язку (GSM), що використовує технологію TDMA, і IS-95 (або cdmaOne), що використовує технологію CDMA. Основною метою систем 2G є надання мобільним користувачам послуг голосового зв'язку. Мережі 2G базуються на цифрових мережах з комутацією каналів для забезпечення сумісності між ТфОП і стільниковими мережами. У мережах радіодоступу 2G GSM підсистема базової станції (BSS) складається з контролера базової станції (BSC) і підсистеми базового приймача (BTS). BSC управляє радіоресурсом, хендовер, управлінням живленням і сигналізацією для BTS. У базовій мережі 2G мережева підсистема (NSS) складається з мобільного комутаційного центру (MSC) і бази даних для інформування мобільних користувачів. Крім того, вона включає шлюзовий мобільний комутаційний центр (GMSC) і з'єднання між мережею GSM і PSTN/ISDN. У наступній версії 2G GSM (яка також називається 2.5G) для підтримки передачі даних розроблена загальна служба пакетної передачі даних (GPRS). Вона включає в себе обслуговуючий вузол підтримки GPRS (SGSN) і шлюзовий вузол підтримки GPRS (GGSN) для мережі з комутацією пакетів. Широкопasmовий множинний доступ з кодовим розділенням каналів (WCDMA) має кращу ефективність використання радіоресурсів, ніж системи 2G. На основі технології WCDMA компанія NTT DoCoMo запустила першу докомерційну мережу 3G в 1998 році, а в жовтні 2001 року розгорнула першу комерційну мережу 3G в Японії. На основі технології cdma200 компанія SK Telecom запустила першу комерційну мережу 3G у Південній Кореї в січні 2002 року. Системи 3G забезпечують набагато

вищу швидкість передачі даних, кращу якість голосу та мультимедійні послуги. Універсальна мобільна телекомунікаційна послуга (UMTS) як система 3G визначена Проектом партнерства 3-го покоління (3GPP). Мережа радіодоступу 3G називається Універсальною наземною мережею радіодоступу (UTRAN). Заснована на мережі радіодоступу 2G, нові функціональні можливості (такі як адаптація швидкості, замкнутий контроль потужності, контроль перевантаження і так далі) включені в eNodeB (це те ж саме, що і базова станція.) і контролер радіомережі (RNC). У мережі 3G CN розширюється від мережі 2G, щоб забезпечити мобільним користувачам високу швидкість передачі даних, і підтримує як мережі з комутацією каналів, так і мережі з комутацією пакетів. У 2009 році системи 4G були розроблені на новій мережевій архітектурі. Голосові послуги та послуги передачі даних більше не розділені. Всі основні IP-мережі систем 4G підтримують як голосовий зв'язок, так і високошвидкісну передачу даних, включаючи мультимедійні послуги, мобільне телебачення, відеоконференції і т.д. Evolved-UTRAN (E-UTRAN) як мережі радіодоступу 4G LTE і Evolved Packet Core (EPC) як опорні мережі 4G LTE визначені 3GPP. З метою підвищення пропускної здатності системи та управління радіоресурсами для радіоінтерфейсу використовується технологія мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDMA). У мережах 4G одноядерна мережа може обробляти як голосовий трафік, так і трафік даних, а також управляти гетерогенним трафіком з різними характеристиками QoS. У мережах радіодоступу 4G E-UTRAN включає лише набір об'єктів eNodeB і розділяє площину управління і площину користувача. У базових мережах 4G EPC включає в себе обслуговуючий шлюз (SGW) і шлюз мережі пакетної передачі даних (PGW). Основними функціями SGW є маршрутизація і пересилання користувацьких пакетів даних, а також робота в якості локального якоря мобільності, коли нам потрібна передача даних. Основними функціями PGW є виділення IP-адрес користувацькому обладнанню (UE) під час налаштування носія за замовчуванням, а також підтримка функцій застосування політик, фільтрації пакетів і еволюційної тарифікації. Об'єкт управління мобільністю (Mobility Management Entity, MME) в площині управління відповідає за процедуру безпеки, процедуру сигналізації та управління місцезнаходженням за допомогою домашнього абонентського сервера (Home Subscriber Server, HSS). Архітектура мережі 4G стає простішою

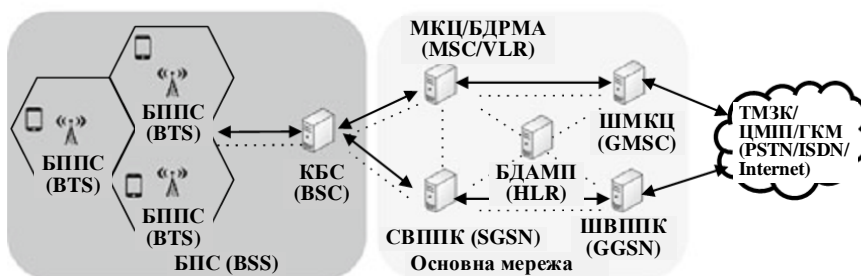
в управлінні та масштабуванні. Основна мета стільникових мереж від 1G до 4G - забезпечити стабільний голосовий зв'язок і швидку та надійну передачу даних для мобільних користувачів. Однак 5G розширив цю сферу, надаючи мобільним користувачам ширший спектр послуг. Системи 5G можна розділити на три основні системи зв'язку:

- 1) вдосконалений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB),
- 2) наднадійний зв'язок з низькою затримкою (URLLC)
- 3) масовий зв'язок машинного типу (mMTC). Архітектура мереж 5G є більш інтелектуальною і включає гнучкі та віртуальні концепції.

Як ми коротко обговорювали в розділі 1, концепція віртуалізації робить мережу більш гнучкою і масштабованою. Це дозволяє створювати нові послуги та додатки. Зокрема, відкрита RAN дозволяє нам мати віртуалізовані компоненти мережі і розгортати обладнання різних виробників з готовим обладнанням завдяки легшій сумісності. Оператори мобільного зв'язку можуть швидко реагувати на зміну вимог користувачів і зростання пропускної здатності.



ЦКМЗ (MTSO): Центр комутації мобільного зв'язку
(a)



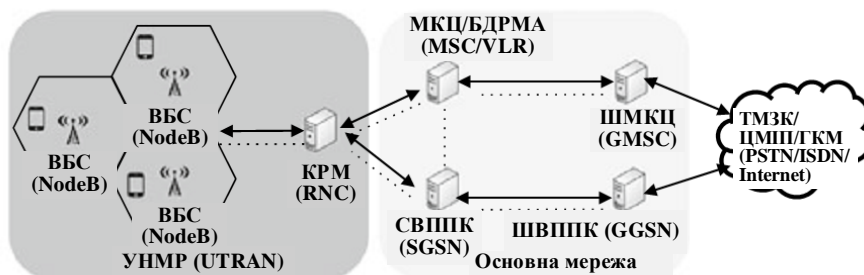
МКЦ (MSC): Мобільний комутаційний центр
БДРМА (VLR): База даних роумінгових мобільних абонентів
БДАМП (HLR): База даних абонентів мобільних пристроїв
ШВПК (GGSN): Сервісний вузол підтримки пакетної комутації

.....: Сигнали керування

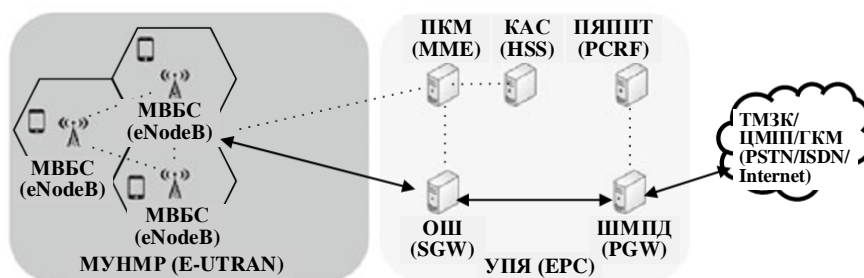
↔: Інформаційний трафік даних

ШВПК (GGSN): Шлюзовий вузол підтримки пакетної комутації
ШМКЦ (GMSC): Шлюзовий мобільний комутаційний центр

(b)



КРМ (RNC): Контролер радіомережі
(c)



Повністю IP-мережі

ПКМ (MME): Пристрій керування мобільністю
ОШ (SGW): Обслуговуючий шлюз
КАС (HSS): Керуючий абонентський сервер
ШМІД (PGW): Шлюз мережі пакетних даних
ПЯПІТ (PCRF): Протокол якості послуг та правил тарифікації

(d)

Рисунок 5.6 - Еволюція стільникових мереж: 1G (a), 2G і 2,5G (b), 3G (c) і 4G (d)

Крім того, можна реалізувати нарізку мережі, дозволивши декільком віртуальним мережам працювати одночасно в загальній мережевій інфраструктурі. Створюючи наскрізні віртуальні мережі, мобільні оператори можуть більш ефективно управляти додатками 5G з різними вимогами і запитами. Базова мережа 5G базується на хмаро орієнтованій архітектурі на основі сервісів (SBA) і розділенні площини управління і площини користувача (CUPS) для підтримки функцій і взаємодій 5G, таких як аутентифікація, управління сеансами, безпека і агрегація трафіку. Оскільки системи 5G включають в себе нові функції, такі як міліметрові хвилі, масивний MIMO, розгалуження мережі і т.д., опорна мережа 5G відрізняється від 4G EPC. У 4G EPC SGW і PGW розкладаються на SGW/PGW-C і SGW/PGW-U, щоб забезпечити мобільним користувачам ефективне масштабування послуг незалежно один від одного. Декомпозиція продовжується в мережах 5G. Функція площини користувача (UPF) управляє обробкою трафіку користувача, а функція площини управління (CPF) і функція управління сеансами SMF займається всією іншою обробкою сигналів. На рисунку 5.6 показано еволюцію стільникових мереж.

Як ми розглянули мережі 5G і еволюцію стільникових мереж у цьому і попередньому розділах, технологія стільникових мереж розвивається, щоб відповідати зростаючим вимогам і потребам. Мережі 6G зіткнуться з новими викликами і можливостями. По-перше, мережеві послуги мінімізують невизначеність і забезпечать мобільним користувачам високу надійність. По-друге, для побудови різних екосистем з вертикальними галузями та підтримки кастомізованих послуг, в мережах 6G повинні бути впроваджені відкритість і кастомізація. По-третє, для того, щоб відповідати високим вимогам систем 6G, в мережах 6G слід впроваджувати технології штучного інтелекту. Мережі 6G повинні сприяти розвитку мережевої розвідки та автоматизації. По-четверте, для досягнення 100% покриття очікується інтеграція мережі з супутниками.

Це буде корисно для послуг мережі 6G у високогір'ї, арктичній зоні, океанах тощо. По-п'яте, очікується більш ефективне використання спектру. Радіочастотний спектр є дуже цінним і дорогим ресурсом. Використовуючи динамічний спектр, штучний інтелект та відповідні технології, ми повинні управляти спектром 6G більш ефективно, гнучко та розумно. По-шосте,

мережева безпека є одним з ключових методів у багатьох додатках і послугах 6G. Зокрема, стільникові мережі підтримуватимуть автономні транспортні засоби. Без забезпечення високого рівня безпеки ми не зможемо досягти рівня 5 для автономних транспортних засобів. У мережах 6G для забезпечення безпеки мережі можуть бути застосовані нові методи безпеки, такі як постквантова криптографія та квантовий розподіл ключів. Нарешті, у 2015 році всі держави-члени Організації Об'єднаних Націй прийняли Цілі сталого розвитку (ЦСР). ЦСР 13 стосується кліматичних дій: "Вжити невідкладних заходів для боротьби зі зміною клімату та її наслідками". Інфраструктура стільникових мереж витрачає багато енергії та вуглецю, збільшуючи пропускну здатність мережі. Мережі 6G повинні бути розгорнуті для досягнення мети низьковуглецевого та енергозберігаючого розвитку.

Традиційна система мобільного зв'язку була схожа на радіомовлення, яке має один потужний приймач на найвищому місці і обслуговує мобільних користувачів на великій території. Такий підхід дозволяє задіяти невелику кількість каналів. Пропускна здатність системи дуже низька. Зазвичай вона підтримує близько 25 каналів у радіусі 80 км. З іншого боку, стільникова система має багато малопотужних трансиверів, що дозволяє покрити велику територію і значно збільшити пропускну здатність системи. Це був прорив у вирішенні проблеми дефіциту спектра і пропускну здатності системи. На рис. 5.7 показано порівняння традиційної системи мобільного зв'язку та системи стільникового зв'язку.

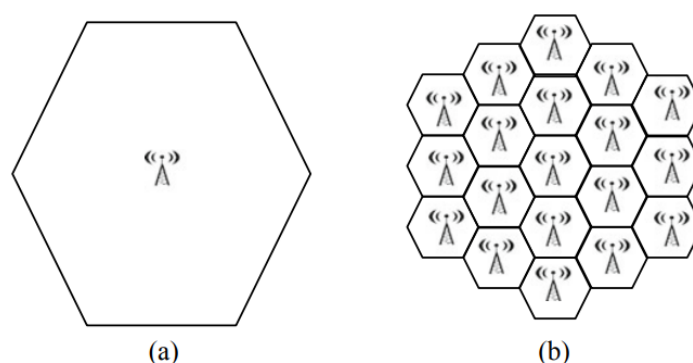


Рисунок 5.7 – Традиційна система мобільного зв'язку (a) та система стільникового зв'язку (b)

Стільникова система, яка має гексагональні стільники, що покривають всю площу без перекриттів, була представлена в роботі "Стільникова концепція" В. Х. Макдональда. Ця стаття створила знакову концепцію стільникового зв'язку і пододала багато проблем бездротових систем зв'язку, таких як енергоспоживання, покриття, пропускна здатність користувачів, спектральна ефективність, перешкоди і так далі. Геометрія шестикутника дозволяє нам мати максимальне покриття. Гексагональна форма стільника зараз повсюдно використовується в стільникових мережах. А саме, найменша кількість стільників може покрити географічну територію, використовуючи геометрію шестикутника. Наприклад, коли ми маємо три різні геометрії з однаковим радіусом R , як показано на рис. 5.8, площа шестикутника забезпечує нам максимальне покриття. Відстань між центром комірки і кожною сусідньою коміркою дорівнює $3R$. Відстань покриття дорівнює $r \sqrt{3} R$. На практиці покриття стільникового зв'язку називають "footprint" (площа покриття). Фактичне покриття стільника визначається на основі моделі прогнозування розповсюдження за допомогою симуляції або польових тестових вимірювань. Як правило, базові станції розгортаються в центрі або вершинах стільника. Хоча стільники географічно відокремлені, сигнали можуть заважати один одному. Використання однієї і тієї ж частоти в стільниковій системі має бути обмежене, і слід розглянути новий метод для підтримки великої кількості каналів.

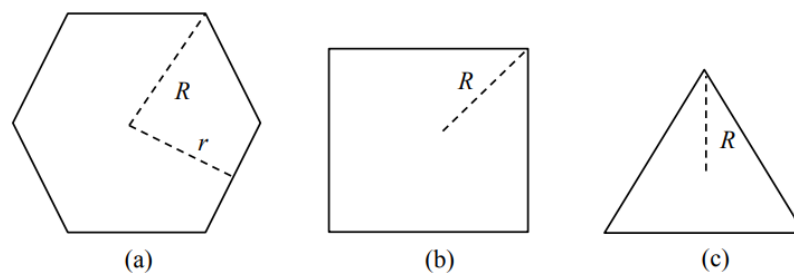


Рисунок 5.8 – Приклад різної геометрії для покриття географічної області: шестикутник (a), квадрат (b) і трикутник (c)

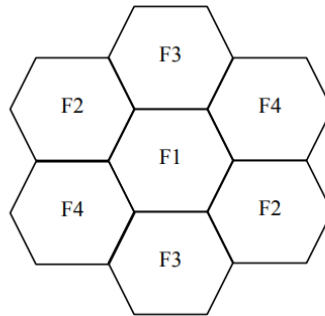


Рисунок 5.9 – Приклад повторного використання частоти в системі стільникового зв'язку

Повторне використання частот є ключовою концепцією стільникової мережі і дозволяє досягти високої пропускну здатності. Покриття стільникової системи поділяється на шестикутні стільники, яким присвоюються різні частоти (F1-F4), як показано на рис. 10.9. Зазвичай за комірками закріплюється від 10 до 50 частотних діапазонів, залежно від мобільного трафіку.

Як видно з рис. 10.9, кожна комірка не має сусідніх комірок з однаковою частотою. Потужність передачі базової станції в кожній комірці повинна регулюватися дуже ретельно. Таким чином, можна очікувати зменшення міжстільникових перешкод, збільшення пропускну здатності стільника і розширення зони покриття. Відстань повторного використання повинна бути достатньою для того, щоб завади від мобільного користувача, який використовує ту саму або сусідню частоту в сусідніх осередках, були досить низькими. У кожній комірці необхідно мати схему множинного доступу, яка дозволяє користувачам отримати доступ до базової станції. Соти можуть бути згруповані. Кластер стільників - це група стільників, де всі доступні частоти повністю зайняті. Важливо мінімізувати інтерференцію між стільниками, що використовують однакові частоти.

Основною метою планування стільникового зв'язку є мінімізація витрат на інфраструктуру та експлуатаційних витрат при збереженні високої продуктивності системи стільникового зв'язку. Кінцевою метою є створення оптимальної економічно ефективної мережі. Планування стільників було досліджено для всіх поколінь стільникових систем. Ключові проектні параметри планування стільникового зв'язку можна підсумувати наступним чином:

- 1) мінімізація загальних витрат на розгортання та експлуатацію мережі,
- 2) максимізація загальної пропускної здатності системи,
- 3) максимізація загального покриття при дотриманні обмежень на перешкоди,
- 4) мінімізація споживання енергії,
- 5) мінімізація керуючої сигналізації.

Оскільки стільникова мережа стає складнішою, потрібно більше керуючих сигналів. Зокрема, оскільки розмір комірки стає меншим, потрібно частіше здійснювати хендовери. Це призводить до втрат енергії, радіо- та мережевих ресурсів, а також витрат. Для того, щоб задовольнити проектні параметри, ми повинні знайти оптимальне розташування базових станцій і конфігурацію мережі. Процес планування стільників складається з трьох етапів: початкове планування (або зменшення), комплексне планування та оптимізація мережі. Процес планування стільників виконується ітеративно. На етапі початкового планування проектувальники мережі знаходять початкове наближення кількості та розміщення базових станцій, щоб покрити зони обслуговування і задовольнити вимоги. На першому етапі вони збирають дані про необхідне покриття, пропускну здатність і якість послуг, а також враховують чисельність населення, географічну зону, частоту, модель розповсюдження тощо. На основі цих даних здійснюється початкове планування, що включає аналіз бюджету зв'язку, аналіз трафіку, оцінку покриття та оцінку пропускної здатності. В результаті першого етапу вони визначають, скільки потрібно базових станцій, де їх розмістити і як налаштувати їхні параметри (тип антени, потужність передачі, висоту, розподіл частот і так далі). На етапі комплексного планування проектувальники мережі визначають фактичне розташування базових станцій у зонах обслуговування і отримують подальшу детальну інформацію, таку як розрахунок покриття, планування ємності, конфігурація базових станцій тощо. Результати початкового етапу планування стають вхідними даними для комплексного планування. Створюються бази даних, що включають географічну та статистичну інформацію, а також детально визначаються місця розташування та конфігурація базових станцій. На етапі оптимізації мережі базові станції розгортаються і запускаються в експлуатацію. Вихідні дані етапу комплексного планування стають вхідними даними етапу оптимізації мережі. Продуктивність

вимірюється за допомогою польових випробувань. Налаштування базових станцій коригуються для досягнення кращої продуктивності. Як правило, процес планування стільникового зв'язку дуже складний, а параметри мережі є компромісним співвідношенням. Наприклад, максимізація покриття стільників означає збільшення потужності передачі. Це вступає в конфлікт з мінімізацією енергії або перешкод. Важко знайти оптимальне рішення, яке б задовольняло численним параметрам проектування. Один з підходів полягає у використанні лінійної комбінації різних конструктивних параметрів з різними ваговими коефіцієнтами. Залежно від важливості, кожен ваговий коефіцієнт може мати різні значення від 0 до 1. Інший підхід полягає у формулюванні задачі з декількома змінними прийняття рішень та різними ваговими коефіцієнтами. Зважені багатоцільові функції дозволяють нам мати більшу гнучкість. Якщо рішення однієї цілі не погіршує іншу ціль, то воно вважається оптимальним. Однак вирішити багатоцільову задачу досить складно. Як правило, економічно ефективна мережа може бути знайдена шляхом ітеративного процесу клітинного планування. Рисунок 5.13 ілюструє процес клітинного планування .

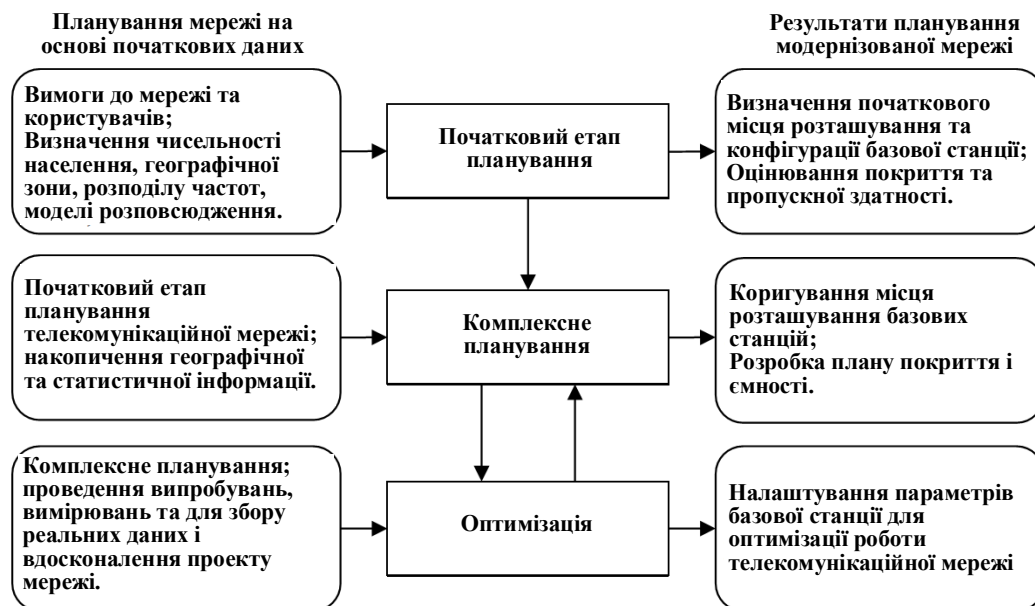


Рисунок 5.10 – Процес планування комірки

Нові функції, такі як гетерогенна мережа, розгортання мережі, орієнтоване на користувача, надщільні мережі, mmWAVE, масивний MIMO, багатозв'язність, інтеграція з супутниковим зв'язком, O-RAN та інші, будуть

включені в стільникові мережі 6G. Ці функції є новими викликами для проектувальників мереж. Зокрема, O-RAN і хмарний RAN декомпонують традиційні функції базових станцій. Наприклад, функції базового діапазону розташовані в центральному вузлі. Віддалені радіоголовки низької складності (RRH) з простим радіоприймачем розподіляються в комірці. Крім того, дрони з простим радіоприймачем можуть діяти як RRH. Таким чином, 6G RAN може бути гнучкою, масштабованою і адаптивною, а також корисною для зниження витрат на розгортання. Однак, необхідний інтенсивний трафік між центральним вузлом і RRH, і вузьке місце в магістралі може стати новою ціллю для оптимізації. Іншим викликом є орієнтований на користувача підхід. Один користувач може бути підключений до декількох базових станцій або RRH. Радіоприймачі можуть бути віртуальними. Планування стільникового зв'язку повинно зосереджуватися на управлінні трафіком, орієнтованому на користувача. Гетерогенні мережі та інтеграція з супутниковим зв'язком будуть ще одним великим викликом. Різні типи трафіку і послуг ускладнюють планування стільникового зв'язку. Безперешкодне співіснування супутникового зв'язку і стільникової мережі призводить до виникнення багатьох дослідницьких проблем, таких як інтерференція, управління трафіком і контроль затримок. Зокрема, спільна інтерференція між супутниковим зв'язком і стільниковими мережами є однією з ключових проблем, оскільки міліметрові діапазони хвиль зараз використовуються в супутниковому зв'язку, а також у стільникових мережах малого радіусу дії. Діапазони 24-29 ГГц виділені в міліметровому діапазоні хвиль 5G. Ка-діапазон (26,5-40 ГГц) є частиною супутникового зв'язку. Вони перекриваються. Одне з ключових застосувань в системах 6G - сервіс IoT. Він вимагатиме масової передачі даних і різної якості послуг. Наприклад, промисловий IoT потребує масового підключення, а також наднадійного зв'язку. Планування стільникового зв'язку повинно враховувати їхні вимоги та покриття. Оскільки 6G RAN має справу з трафіком управління і трафіком даних користувача окремо, планування стільникового зв'язку повинно враховувати різні характеристики і проектувати мережі з урахуванням цих характеристик. Трафік управління повинен вимагати високої надійності і низької пропускної здатності. Трафік даних користувача повинен задовольняти вимоги щодо гнучкості, адаптивності, високої пропускної здатності, низької затримки та енергоефективної передачі. Для того, щоб відповідати різним

вимогам, конфігурація мережі повинна бути скоригована. Оскільки ми коротко розглянули нові виклики планування мереж 6G, багато нових технологій 6G будуть впроваджуватися для задоволення високого рівня вимог 6G і задоволення нових потреб. Планування стільникових мереж 6G буде головним викликом.

6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1)здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2)ипроведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

6.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 6.1 та 6.2.

Таблиця 6.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	57	59	60
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		58,7		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та

проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 6.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	64	75	69
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	69,3		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (6.1)$$

де $k_{нов}$, $k_{теор}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{нов} = 58,7$, $k_{теор} = 69,3$ балів;

0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 58,7 + 0,4 \cdot 69,33 = 62,93 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{нау}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом», даний рівень становить 62,93 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

6.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням

конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою 6.2:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (6.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=20$ дні.

$$Z_o = 15000,00 \cdot 20 / 20 = 15000,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник проекту	15000,00	750,00	20	15000,00
Старший науковий співробітник	12000,00	600,00	15	9000,00
Інженер розробник телекомунікаційних систем	10000,00	500,00	8	4000,00
Технік	7420,00	371,00	8	2968,00
Всього				30968,00

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (6.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (6.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=6700,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б);

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 20$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (20 \cdot 8) = 62,18 \text{ грн.}$$

$$Z_{p1} = 62,18 \cdot 4,50 = 279,83 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Підготовка робочого місця старшого наукового співробітника	4,50	2	1,10	62,18	279,83
Підготовка робочого місця інженера-розробника телекомунікаційних систем	5,50	2	1,10	62,18	342,01
Введення програмних	6,80	3	1,35	76,32	518,96

блоків моделювання поведінки апаратури мереж 6G із вбудованим ШІ					
Інсталяція програмного забезпечення математичного моделювання мереж 6G	10,00	4	1,50	84,80	847,97
Введення програмних блоків моделювання поведінки мереж 6G із вбудованим ШІ	3,50	5	1,70	96,10	336,36
Налагодження програмних блоків математичної моделі дослідження	4,00	5	1,70	96,10	384,41
Формування (введення) бази даних дослідження моделі мережі	15,25	3	1,35	76,32	1163,84
Тестування взаємодії моделей НВЧ приймача, передавача, антенного обладнання мереж 6G	3,20	3	1,35	76,32	244,22
Контроль результатів дослідження	4,80	4	1,50	84,80	407,03
Всього					4524,62

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (6.5)$$

де $H_{\text{дод}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{дод}} = (30968,00 + 4524,62) \cdot 10 / 100\% = 3549,26 \text{ грн.}$$

Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (6.6)$$

де H_{zn} – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (30968,00 + 4524,62 + 3549,26) \cdot 22 / 100\% = 8589,21 \text{ грн.}$$

Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{в}j} \quad (6.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

$C_{\text{в}j}$ – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3,0 \cdot 220,00 \cdot 1,11 - 0 \cdot 0 = 732,60 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір офісний А4 MAESTRO standart+ (500)	220,00	3,0	-	-	732,60
Папір для записів А5 Marshal DEX 250	86,00	3,0	-	-	286,38
Органайзер офісний SKIPER 2500	175,00	4,0	-	-	777,00
Канцелярське приладдя BOSS UAS	150,00	4,0	-	-	666,00
Картридж для принтера HP Laser jet 1566	2135,00	2,0	-	-	4739,70
Диск оптичний CD-R Optic MAX	15,00	4,0	-	-	66,60
Flesh-пам'ять 64 GB Startrack	165,00	1,0	-	-	183,15
Всього					7451,43

Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (6.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_e = 1 \cdot 2940,00 \cdot 1,11 = 3263,40 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Роутер з підтримкою технології МІМО	1	2940,00	3263,40
Всього			3263,40

Специфікування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Специфікування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання специфікування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення. Витрати за даною статтею відсутні.

Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.і}} \cdot K_i, \quad (6.9)$$

де $C_{\text{инрг}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.і}}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 9750,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 10822,50 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 6.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Математичне середовище MatLab 12	1	9750,00	10822,50
Прикладне ПЗ Mathematica	1	7620,00	8458,20
Модель імітатора передавача	1	2980,00	3307,80
Модель імітатора приймача	1	3250,00	3607,50
Всього			26196,00

Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_б}{T_г} \cdot \frac{t_{вик}}{12} \quad (6.10)$$

де $Ц_б$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_г$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (4350,00 \cdot 1) / (2 \cdot 12) = 181,25 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
ОС Windows	4350,00	2	1	181,25
Комп'ютерне обладнання для вирішення проблем моделювання процесів в системах 6G EOM HP Z6 G4 WKS Tower i9/ Xeon Silver 4108 (6QP06EA)	110260,00	5	1	1837,67

Пакет Visual System Simulator	7100,00	2	1	295,83
Пакет Microwave Office	7560,00	2	1	315,00
Пакет Matlab 2020	5360,00	2	1	223,33
Пристрої передачі даних	8790,00	5	1	146,50
Оргтехніка	7360,00	5	1	122,67
Приміщення лабораторії досліджень	390000,00	25	2	2600,00
Робоче місце інженера-розробника телекомунікаційних систем	8420,00	7	2	200,48
Робоче місце старшого наукового співробітника	8600,00	7	2	204,76
Всього				6127,49

Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{\text{вн}i}}{\eta_i}, \quad (6.11)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 6,25$ грн;

$K_{\text{вн}i}$ – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{\text{вн}i} < 1$;

\square_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\square_i < 1$.

$B_e = 0,10 \cdot 160,0 \cdot 6,25 \cdot 0,95 / 0,97 = 100,00$ грн.

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Пристрої передачі даних	0,10	160,0	100,00
Оргтехніка	0,50	2,5	7,81
Комп'ютерне обладнання для вирішення проблем	0,40	160,0	400,00

модельовання процесів в системах 6G EOM HP Z6 G4 WKS Tower i9/ Xeon Silver 4108 (6QP06EA)			
Робоче місце інженера-розробника телекомунікаційних систем	0,11	160,0	110,00
Робоче місце старшого наукового співробітника	0,11	160,0	110,00
Всього			727,81

Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (6.12)$$

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cv} = 22\%$.

$$B_{cv} = (30968,00 + 4524,62) \cdot 22 / 100\% = 7808,38 \text{ грн.}$$

Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (6.13)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{cn} = 30\%$.

$$B_{cn} = (30968,00 + 4524,62) \cdot 30 / 100\% = 10647,79 \text{ грн.}$$

Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (6.14)$$

де H_{ie} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{ie} = 50\%$.

$$I_e = (30968,00 + 4524,62) \cdot 50 / 100\% = 17746,31 \text{ грн.}$$

Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (6.15)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (30968,00 + 4524,62) \cdot 100 / 100\% = 35492,62 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доо} + Z_n + M + K_в + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_в + B_{нзв}. \quad (6.16)$$

$$B_{заг} = 30968,00 + 4524,62 + 3549,26 + 8589,21 + 7451,43 + 3263,40 + 0,00 + 26196,00 + 6127,49 + 727,81 + 7808,38 + 10647,79 + 17746,31 + 35492,62 = 163092,32 \text{ грн.}$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (6.17)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,9$.

$$ZB = 163092,32 / 0,9 = 181213,69 \text{ грн.}$$

6.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_P рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_P = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (6.18)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Приймемо $I=4$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n=0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n=1$, коли результати роботи будуть

використовуватись частково; $n=2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n=3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n=2$;

T_C – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_C = 3$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R=4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R=3$; якщо нижче відомих результатів, то $R=1$. Прийmemo $R=4$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 181213,69$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,08$ років, (1 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів.

$$K_P = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = \frac{4^2 \cdot 3 \cdot 4}{181,2 \cdot 0,08} = 12,71.$$

Якщо $K_P > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

6.4 Висновок до розділу 6

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом» складають 181213,69 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_P > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Праця є цілеспрямованою діяльністю людини, що орієнтована на створення за допомогою знарядь виробництва матеріальних і духовних цінностей, необхідних для життя людей. Сучасне виробництво базується на застосуванні складної техніки, машин, устаткування та певних технологій, отже, виробниче середовище стає агресивнішим стосовно працівника, збільшується ризик отримати травму або захворювання в процесі його взаємодії із засобами праці і компонентами виробництва, а тому, він потребує відповідних заходів з охорони життя та здоров'я. Трудова діяльність є не тільки найбільш відповідальною сферою життя суспільства, а й запорукою самого існування людства. Праця є основою життєдіяльності людини як індивіда і члена суспільства, вона безпосередньо впливає на формування і розвиток суспільних відносин. Завдяки цьому найважливішим завданням будь-якої демократичної держави є створення найбільш сприятливих умов для плідної праці та її охорони.

Розробка універсального програматора для сучасних мікроконтролерів відбувалася в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. В приміщенні, згідно ГОСТ 12.0.003-74, можуть бути наявні вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

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

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

Відповідно до визначених факторів формуємо рішення щодо безпечного виконання роботи, а також з гігієни праці та виробничої санітарії, які забезпечують безпечні та комфортні виробничі умови.

7.1. Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Обладнання приміщення та робочого місця

Загальні вимоги до умов праці на підприємствах встановлено законодавством про працю. Відповідно до ч. 1 ст. 6 Закону України «Про охорону праці» від 14.10.92 р. № 2694-ХІІ умови праці на робочому місці, безпека технологічних процесів, устаткування та інших засобів виробництва, стан засобів колективного та індивідуального захисту, що використовуються працівником, а також санітарно-побутові умови повинні відповідати вимогам законодавства.

Більшість нормативів щодо умов праці працівників, які використовують ПК та відповідне програмне забезпечення для виконання роботи, встановлено на рівні державних стандартів. Основними з них є:

– Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 2.3.6.037-99, затверджені постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.99 р. № 37;

– Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99, затверджені постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.99 р. № 42;

– Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ДСанПіН 3.3.2.007-98, затверджені постановою Головного державного санітарного лікаря України від 10.12.98 р. № 7;

– Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників, затверджені наказом МНС від 25.01.2012 р. № 67.

Організація робочого місця розробника універсального програматора для сучасних мікроконтролерів повинна забезпечувати відповідність всіх його елементів і їхнього розташування ергономічним вимогам та особливостям трудової діяльності.

Приміщення в якому відбувалася розробка універсального програматора для сучасних мікроконтролерів (рис.7.1) є має загальну площу $15,75 \text{ м}^2$ і об'єм – $50,4 \text{ м}^3$.

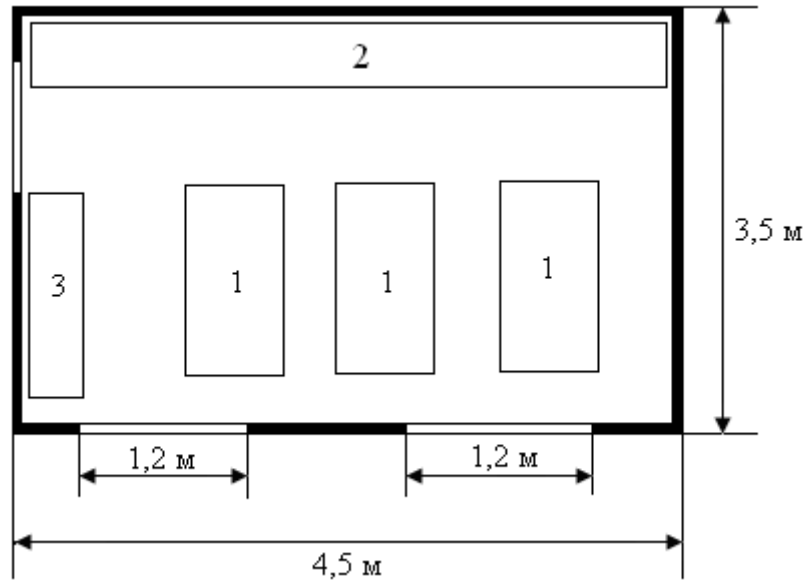


Рис. 7.1. Схема приміщення

Умовні позначення: 1 – робочий стіл; 2 – меблі для документації; 3 – стіл для копіювальної техніки.

В приміщенні працює 3 працівника. На одного працівника припадає $5,25 \text{ м}^2$ площі та $16,8 \text{ м}^3$ об'єму повітря робочої зони. Вимоги НПАОП 0.00-1.28-10 [9] щодо вказаних параметрів не дотримані.

Розміри робочого столу: висота – 725 мм, ширина – 600 -1400 мм, глибина – 800 – 1000 мм, що відповідає вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98. Робочий стіл для ПК має простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше 500 мм, глибиною на рівні колін не менше 450 мм, на рівні витягнутої ноги – не менше 650 мм.

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

Оскільки в приміщенні лише три робочі місця, обладнані ПК, тому необхідності відділяти їх одне від одного перегородками висотою 1,5 – 2 м немає.

Мінімальні вимоги безпеки під час роботи:

- щодня перед початком роботи необхідно очищати екранні пристрої від пилу та інших забруднень;

- після закінчення роботи екранні пристрої слід відключати від електричної мережі;
- у разі виникнення аварійної ситуації необхідно негайно відключити екранний пристрій від електричної мережі.

Не допускається:

- виконувати технічне обслуговування, ремонт і налагодження екранних пристроїв безпосередньо на робочому місці працівника під час роботи з екранними пристроями;
- відключати захисні пристрої, самочинно проводити зміни у конструкції та складі екранних пристроїв або їх технічне налагодження;
- працювати з екранними пристроями, у яких під час роботи виникають нехарактерні сигнали, нестабільне зображення на екрані та інші несправності.

Електробезпека приміщення

В досліджуваному приміщенні лінія електромережі для живлення ЕОМ, периферійних пристроїв ЕОМ й устаткування для обслуговування, ремонту й налагодження ЕОМ виконана як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазових, нульових робочих і нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення електроприймачів.

Нульовий захисний провідник прокладається від стійки групового розподільного щита, розподільного пункту до розеток електроживлення. Не допускається підключати на щиті до одного контактного затискача нульовий робочий та нульовий захисний провідники. Площа перерізу нульового робочого та нульового захисного провідника в груповій трипровідній мережі має бути не менше площі перерізу фазового провідника. Усі провідники відповідають номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту.

Персональні комп'ютери, периферійні пристрої, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники), електропроводи та кабелі за виконанням і ступенем захисту відповідають класу зони, мають апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів. Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі

необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, застосовувати негорючу ізоляцію.

Приміщення, в якому відбувалося дослідження за класом електробезпеки – це приміщення без підвищеної небезпеки, оскільки фактори підвищеної та особливої небезпеки на робочому місці відсутні.

Персональні комп'ютери, периферійні пристрої повинні підключатися до електромережі тільки з допомогою справних штепсельних з'єднань і електричних розеток заводського виготовлення. Штепсельні з'єднання та електричні розетки, окрім контактів фазового та нульового робочого провідників, повинні мати спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника. Конструкція їх має бути такою, щоб приєднання нульового захисного провідника відбувалося раніше, ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним. Необхідно унеможливити з'єднання контактів фазових провідників з контактами нульового захисного провідника. Неприпустимим є підключення комп'ютерів, периферійних пристроїв до звичайної двопровідної електромережі, в тому числі – з використанням перехідних пристроїв.

Є неприпустимими:

- експлуатація кабелів та проводів з пошкодженою або такою, що втратила захисні властивості за час експлуатації, ізоляцією;
- застосування саморобних подовжувачів, застосування для опалення приміщення нестандартного (саморобного) електронагрівального обладнання або ламп розжарювання;
- користування пошкодженими розетками, розгалужувальними та з'єднувальними коробками, вимикачами та іншими електровиробами, а також лампами, скло яких має сліди затемнення або випинання;
- використання електроапаратури та приладів в умовах, що не відповідають вказівкам (рекомендаціям) підприємств-виготовлювачів.

7.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

Мікроклімат

Суттєвий вплив на стан організму працівника, його працездатність здійснює мікроклімат (метеорологічні умови) у виробничих приміщеннях, під якими розуміють клімат внутрішнього середовища цих приміщень, що визначається діючою на організм людини сукупністю температури, вологості, руху повітря та випромінювання від нагрітих або охолоджених поверхонь. Мікроклімат виробничих приміщень впливає на стан організму працюючих та їх теплообмін з навколишнім середовищем.

Робота розробника універсального програматора для сучасних мікроконтролерів за енерговитратами відноситься до категорії 1а.

Допустимі параметри мікроклімату для категорії 1а наведені в табл.7.1.

Таблиця 7.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для підтримки допустимих значень мікроклімату та концентрації позитивних і негативних іонів необхідно передбачати установки або прилади зволоження та/або штучної іонізації, кондиціонування повітря. В Україні відсутні затверджені на законодавчому рівні гранично допустимі норми вмісту вуглекислого газу в повітрі для житлових, офісних та громадських споруд. Під час перевищення припустимих значень робочий день співробітників повинен бути скорочений мінімум на 10 % у відповідності до нормативних вимог.

Для підтримки оптимального рівня мікроклімату в приміщенні передбачено систему кондиціонування повітря з індивідуальним регулюванням температури, систему центрального опалення та систематичне вологе прибирання приміщення.

Склад повітря робочої зони

Шкідливі речовини, що потрапили в організм людини спричинюють порушення здоров'я лише в тому випадку, коли їхня кількість в повітрі перевищує граничну для кожної речовини величину. В приміщенні, де здійснюється розробка універсального програматора для сучасних мікроконтролерів, можливими шкідливими речовинами у повітрі є фенол, пил, озон та вуглекислий газ. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, згідно ДСН 3.3.6.042-99, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 7.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

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

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл. 7.3).

Таблиця 7.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

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

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

Виробниче освітлення

Як відомо, тривала робота за комп'ютером та з документами при недостатньому рівні освітленості може призвести до значного перенапруження зору, тому вимоги до освітлення є досить важливими. Додатково, окрім вже

перелічених документів, вимоги до освітлення встановлено ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення». Норми освітленості при штучному освітленні та КПО при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 7.4.

Таблиця 7.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє	Бокове	Верхнє або верхнє	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Робоче місце необхідно розмішувати таким чином, щоб уникнути попадання прямого світла в очі. Відносно вікон робоче місце необхідно організувати так, щоб природне світло було з лівого боку. Для забезпечення захисту за необхідності використовують локальні світлофільтри (засоби індивідуального захисту очей) та інших засобів захисту, що пройшли випробування в акредитованих лабораторіях і мають щорічний гігієнічний сертифікат.

Штучне освітлення приміщення має здійснюватись системою загального рівномірного освітлення. У приміщеннях при переважній роботі з документами допускається використання системи комбінованого освітлення, тобто встановлення світильників місцевого освітлення додатково до загального.

Як джерела штучного освітлення необхідно використовувати люмінесцентні лампи. Допускається застосування ламп розжарювання у світильниках місцевого освітлення та, у разі влаштування відбитого освітлення у виробничих чи адміністративно-громадських приміщеннях, металогалогенних ламп потужністю 250 Вт.

Світильники місцевого освітлення слід встановлювати таким чином, щоб не створювати відблисків на поверхні екрана, а освітленість екрана має не перевищувати 300 лк.

Для забезпечення нормованих значень освітленості у приміщеннях відповідно необхідно мити вікна і світильники не рідше 2 разів на рік, а також своєчасно замінювати лампи, що перегоріли.

Виробничий шум

Вплив шуму на організм людини пов'язаний в основному із застосуванням нового, високопродуктивного устаткування, з механізацією й автоматизацією виробничих процесів, переходом на високі швидкості під час експлуатації верстатів та агрегатів. Джерелами шуму можуть бути двигуни, насоси, компресори, турбіни, пневматичні інструменти, молоти, дробарки, верстати та інші установки, що мають у своєму складі рухомі механізми та обертові деталі. Шум з точки зору охорони праці розглядається як стресовий чинник і загальний біологічний подразник, який негативно впливає на всі органи і системи організму, передусім на центральну нервову і серцевосудинну системи.

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99.

Таблиця 7.5 - Рівень звукового тиску

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

Для забезпечення дотримання допустимих рівнів шуму на робочих місцях застосовуються засоби звукопоглинання, вибір яких обґрунтовується спеціальними інженерно-акустичними розрахунками (п. 3.3.3 ДСанПіН 3.3.2.007-98).

Перелік організаційно-технічних заходів щодо обмеження несприятливого впливу шуму та вібрації на працюючих наведено в ДСН 2.3.6.037-99 та ДСН 3.3.6.039-99, серед яких зменшення шуму та вібрації на шляху розповсюдження засобами ізоляції та поглинання, наприклад, за рахунок використання гумових, поролонових, інших шумо- чи вібропоглинаючих матеріалів, або інших матеріалів аналогічного призначення, що дозволені для оздоблення приміщень органами державного санітарно-епідеміологічного нагляду.

Виробничі випромінювання

Вимоги щодо рівня неіонізуючих електромагнітних випромінювань, електростатичних та магнітних полів встановлюються відповідно до ДСанПіН 3.3.2.007-98, а також Вимог до роботодавців щодо захисту працівників від шкідливого впливу електромагнітних полів, затверджених наказом Міненергетики від 05.02.2014 р. № 99, ДСанПіН 3.3.6.096-2002.

Значення напруженості електростатичного поля на робочих місцях (як у зоні екрана дисплея, так і на поверхнях обладнання, клавіатури, друкувального пристрою) мають не перевищувати гранично допустимих відповідно до встановлених норм.

Ступінь впливу електромагнітних випромінювань від ПК на організм працівника залежить від діапазону частот, тривалості опромінення, характеру опромінення, режиму опромінення, розмірів поверхні тіла, яке опромінюється, та індивідуальних особливостей організму. Гранично допустимі рівні електромагнітного поля для працівника становлять наведені в таблиці 7.6.

Таблиця 7.6 - Допустимі параметри електромагнітних неіонізуючих випромінювань і електростатистичного поля

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії, Вт/кв.м
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/м	
Напруженість електромагнітного поля 60 кГц до 3 мГц	50	5	
Напруженість електромагнітного поля 3 кГц до 30 мГц	20		
Напруженість	10	0,3	

електромагнітного поля 30 кГц до 50 мГц			
Напруженість електромагнітного поля 30 кГц до 300 мГц	5		
Напруженість електромагнітного поля 300 кГц до 300 гГц			10Вт/кв. м
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-С (220 — 280 нм)			0,001
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-В (280 — 320 нм)			0,01
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-А (320 — 400 нм)			10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в видимій частині спектру 400 — 760 нм			10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в інфрачервоній частині спектру 0,76 — 10,0 мкм			35,0 — 70,0
Напруженість електричного поля відеодисплейного терміналу			20кВ/м

Окрім цього, наслідком сучасного технічного прогресу є зростання з кожним роком енергоспоживання та збільшення навантаження на кабелі, що в свою чергу призводить до збільшення напруги електромагнітних полів, несприятлива дія яких може призвести до погіршення стану здоров'я працівників. Для обмеження впливу ЕМП на розробника слід використовувати лише якісну техніку із сертифікатом якості і дотримуватися встановленого часу роботи за ПК.

Психофізіологічні фактори

Оцінка психофізіологічних факторів під час розробки універсального програматора для сучасних мікроконтролерів здійснюється відповідно до Гігієнічної класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності

факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу.

Загальні енергозатрати організму: до 174 Вт.

Стереотипні робочі рухи (кількість за зміну): до 40 000.

Робоча поза: вільна зручна поза, можливість зміни пози («сидячи – стоячи») за бажанням працівника; перебування в позі «стоячи» до 40% часу зміни.

Нахили тулуба (вимушені, більше 30°), кількість за зміну: до 50 раз.

Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження:

- зміст роботи – творча діяльність, що вимагає вирішення складних завдань за відсутності алгоритму;

- сприймання інформації та їх оцінка – сприймання сигналів з наступним порівнянням фактичних значень параметрів з їх номінальними значеннями.

Заключна оцінка фактичних значень параметрів;

- розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, виконання завдання та його перевірка.

Сенсорні навантаження:

- зосередження (%за зміну) – до 5-75%;

- щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 150;

- навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 50 до 80 %;

- спостереження за екранами відеотерміналів (годин на зміну) – 4-6 год.

- навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 16 до 20.

Емоційне навантаження:

ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; Ступінь ризику для власного життя – вірогідний;

Режим праці:

- тривалість робочого дня – більше 8 год;

- змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

За зазначеними показниками важкості та напруженості праці, робота, яка виконується належить до допустимого класу умов праці (напруженість праці середнього ступеня).

7.3 Оцінка радіаційного захисту підвального приміщення

Дія радіації на людину

Національна академія наук (НАН) США дослідила ризики низькоенергетичного, низькодозного іонізуючого випромінювання і дійшла висновку, що малоімовірно, що існує певне граничне значення, при перевищенні якого виникає загроза онкологічних захворювань. Відповідно, говорити про якийсь «безпечний» рівень радіаційного опромінення неправильно. Немає жодної гарантії, що навіть найменша доза радіації не спричинить певної шкоди. Дані про здоров'я людини також вказують на те, що жінки і діти є більш уразливими до радіаційного опромінення, ніж дорослі чоловіки, при цьому до найбільш уразливої категорії відносяться вагітні жінки.

Радіонукліди є джерелом двох різних видів радіації. Перший – частинки (альфа, бета і нейтрони). Другий – електромагнітні хвилі (гамма і рентгенівське випромінювання). Рентгенівське випромінювання, як правило, генерується обладнанням, що використовується в хірургічній медицині і стоматології.

Альфа-частинки є високоенергетичними, великими, важкими, і не можуть переміщуватись на велику відстань. Проте, потрапивши в організм, вони є достатньо сильними, щоб розривати клітини органів або крові, вивільняючи свою колосальну енергію у сусідні тканини і залишаючи по собі масштабні руйнування. Джерелом альфа-частинок, як правило, є природні нукліди або важкі трансуранові елементи, які утворюються в ядерному паливі. Уран, торій і радон – це кілька природних ізотопів, які є джерелом альфа-частинок. Трансуранові елементи – це нукліди, які є важчими за уран і містять плутоній з нептунієм

Бета-частинки – це електрони. Порівняно з розміром альфа-частинок вони є мікročастинками, які можуть переміщуватись на більшу відстань і мають кращу проникну здатність. Хоча бета-частинки можуть залишати опіки на шкірі в результаті зовнішнього опромінення, найбільшунезбезпеку вони несуть при потраплянні в організм шляхом вдихання або з їжею. Джерелом бета-частинок переважно є нукліди, які утворюються в процесі ділення, що протікає в атомних реакторах. Радіоактивний водень (третій) і стронцій-90 (який імітує кальцій в

організмі) – це два найбільш поширених джерела випромінювання бета-частинок, які є небезпечними для здоров'я.

Гамма-випромінювання є найбільш проникним типом радіації і його можна зупинити тільки товстим шаром свинцю або бетону. Воно становить небезпеку в результаті як зовнішнього, так і внутрішнього опромінення, і має як природні (наприклад, радій-226), так і штучні джерела походження у виді продуктів поділу (наприклад, цезій-134). Барій-137 є продуктом розпаду цезію-137 і джерелом гамма-випромінювання.

Розрахунок коефіцієнта протирадіаційного захисту

Коефіцієнт протирадіаційного захисту приміщення, в якому перебуватимуться люди з врахуванням його розташування у підвалі розраховуватимемо за формулою

$$K_3 = \frac{0,77 \times K_1 \times K_{CT} \times K_{\Gamma}}{K_M \times (1 - K_{Ш}) \times [(K_0 \times K_{CT} + 1) \times (K_{\Gamma} + 1)]}$$

Для розрахунку використаємо такі дані:

1. Стіни залізобетонні (40 см), маса $1\text{ м}^2 - 800\text{ кг}$.
2. Стіни цегляні (25 см), маса $1\text{ м}^2 - 375\text{ кг}$.
3. Перегородки цегляні (12 см), маса $1\text{ м}^2 - 180\text{ кг}$.
4. Маса 1 м^2 міжповерхового перекрыття – 690 кг/м^2 .
5. Площа дверних прорізів: Д-1, Д-2 – $2,1\text{ м}^2$; Д-5 – $2,95\text{ м}^2$.
6. Площа підлоги для розрахунку приміщення – $40,6\text{ м}^2$;
7. Висота приміщення – $3,3\text{ м}$;
8. Ширина зараженої ділянки, що примикає до приміщення – $5,5\text{ м}$;
9. Плоскі кути:

Кут $\square_1 = 106^\circ$. Проти кута розташовані:

- 4 перегородки цегляні (12 см) площею $24,1\text{ м}^2$;
- 3 стіни залізобетонні (40 см) площею $24,1\text{ м}^2$;
- перегородка цегляна (12 см) площею $24,1\text{ м}^2$ з прорізом площею $2,1\text{ м}^2$.

Кут $\square_2 = 74^\circ$. Проти кута розташовані:

- стіна залізобетонна (40 см) площею 18,3 м².

Кут $\alpha_3 = 106^\circ$. Проти кута розташовані:

- стіна залізобетонна (40 см) площею 24,1 м²;

- перегородка цегляна (12 см) площею 24,1 м².

Кут $\alpha_4 = 74^\circ$. Проти кута розташовані:

- перегородка цегляна (12 см) площею 18,3 м² з прорізом площею 2,1 м²;

- стіна цегляна (25 см) площею 18,3 м²;

- стіна залізобетонна (40 см) площею 18,3 м² з прорізом площею 2,95 м²;

- стіна залізобетонна (40 см) площею 18,3 м².

Визначаємо приведені маси стін і перегородок, розташованих проти плоских кутів.

Кут $\alpha_1 = 106^\circ$.

Маса 1 м² 4-х перегородок цегляних (12 см) площею 24,1 м²

$$G_{36} = 4 \times 180 = 720 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м² 3-х стін залізобетонних (40 см) площею 24,1 м²;

$$G_{36} = 3 \times 800 = 2400 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м² перегородки цегляної (12 см) площею 24,1 м² з прорізом площею 2,1 м²

$$\alpha_{ст} = \frac{2,1}{24,1} = 0,09 \quad G_{36} = 375(1 - 0,09) = 341,3 \text{ (кг)}.$$

Сумарна маса 1 м² стін і перегородок плоского кута α_1

$$G_{\Sigma}^1 = 720 + 2400 + 341,3 = 3461,3 \text{ (кг)}.$$

Кут $\alpha_2 = 74^\circ$.

Маса 1 м² стіни залізобетонної (40 см) площею 18,3 м²

$$G_{36} = 800 \text{ (кг)}.$$

Сумарна маса 1 м² стін плоского кута α_2

$$G_{\Sigma}^2 = 800 \text{ (кг)}.$$

Кут $\alpha_3 = 106^\circ$.

Маса 1 м² стіни залізобетонної (40 см) площею 24,1 м²

$$G_{36} = 800 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м² перегородки цегляної (12 см) площею 24,1 м².

$$G_{36} = 180 \text{ (кг)}.$$

Сумарна маса 1 м² стін плоского кута α_3

$$G_{\Sigma}^3 = 800 + 180 = 980 \text{ (кг)}.$$

Кут $\alpha_4 = 74^\circ$.

Маса 1 м² перегородка цегляна (12 см) площею 18,3 м² з прорізом площею 2,1 м²

$$\alpha_{cm} = \frac{2,1}{18,3} = 0,11 \quad G_{36} = 180(1 - 0,11) = 160,2 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м² стіни цегляної (25 см) площею 18,3 м²

$$G_{36} = 375 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м² стіни залізобетонної (40 см) площею 18,3 м² з прорізом площею 2,95 м²

$$\alpha_{cm} = \frac{2,95}{18,3} = 0,16, \quad G_{36} = 800(1 - 0,16) = 672 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м² стіни залізобетонної (40 см) площею 18,3 м²

$$G_{36} = 800 \text{ (кг)}.$$

Сумарна маса 1 м² стін плоского кута α_4

$$G_{\Sigma}^4 = 160,2 + 375 + 672 + 800 = 2007,2 \text{ (кг)}.$$

Сумарні маси 1 м² стін і перегородок проти плоских кутів приміщення

$$G_{\Sigma}^1 = 3461,3 \text{ (кг)}; \quad G_{\Sigma}^2 = 800 \text{ (кг)};$$

$$G_{\Sigma}^3 = 980 \text{ (кг)}; \quad G_{\Sigma}^4 = 2007,2 \text{ (кг)}.$$

Сумарна маса стін і перегородок проти другого і третього плоских кутів приміщення менше 1000 кг/м^2 , тому коефіцієнт K_1 , що враховує долю радіації після послаблення зовнішніми і внутрішніми стінами складе

$$K_1 = \frac{360}{36 + \sum \alpha_i} = \frac{360}{36 + 180} = 1,67.$$

За мінімальною сумарною масою стін $G_{\text{сер}} = 800 \text{ кг/м}^2$ визначаємо коефіцієнт $K_{\text{СТ}} = 250$.

За шириною будівлі визначаємо коефіцієнт, який враховує долю розсіювання випромінювання $K_{\text{Ш}} = 0,47$ (висота приміщення складає 3 м) [].

Коефіцієнт K_0 , що враховує зниження поглинальної здатності зовнішніх стін за рахунок наявності в прорізів та проникнення в приміщення вторинного випромінювання, з врахуванням висоти від підлоги до дверей 0,05 м розрахуємо

$$K_0 = 0,08 \frac{S_0}{S_{\text{П}}} = 0,08 \frac{2,1}{40,6} = 0,004,$$

де $S_0 = 2,1 \text{ м}^2$ – загальна площа віконних перерізів приміщення;
 $S_{\text{П}} = 40,6 \text{ м}^2$ – площа підлоги приміщення.

Коефіцієнт, що враховує зниження дози радіації в будинку, розташованому районі забудови, від екранувальної дії сусідніх споруд $K_{\text{М}} = 0,55$.

Коефіцієнт, що враховує кратність послаблення радіації перекриттям підвалу $K_{\text{П}} = 800$ [].

Тоді

$$\begin{aligned} K_3 &= \frac{0,77 \times K_1 \times K_{\text{СТ}} \times K_{\text{П}}}{K_{\text{М}} \times (1 - K_{\text{Ш}}) \times [(K_0 \times K_{\text{СТ}} + 1) \times (K_{\text{П}} + 1)]} = \\ &= \frac{0,77 \times 1,67 \times 25 \times 800}{0,55 \times (1 - 0,47) \times [(0,004 \times 250 + 1) \times (800 + 1)]} = 550 \end{aligned}$$

Проведені для приміщення підвалу розрахунки показали, що коефіцієнт протирадіаційного захисту цього приміщення складає 550, тому дане та інші

внутрішні підвальні приміщення будівлі можна використати як протирадіаційне укриття або сховище для чого необхідно забезпечити можливість герметизації приміщення, фільтровентиляційну систему та інші системи життєзабезпечення.

ВИСНОВКИ

При дослідженні систем 6G, було визначено декілька відмінностей між стільниковими системами 5G та системами 6G. Більша пропускна здатність: системи 6G мають значно більшу пропускну здатність, ніж 5G. Це дозволяє передавати більше даних за короткий час. Менша затримка: системи 6G будуть мати меншу затримку порівняно з 5G, що дозволить використовувати їх для реального часу додатків. Краща енергоефективність: системи 6G мають бути більш енергоефективними, що дозволяє їм працювати довше з однією зарядкою, і тим самим зменшує негативний вплив на довкілля. Нові можливості: системи 6G дозволяють впровадження нових додатків, які не були доступні на попередніх поколіннях мереж мобільного зв'язку, таких як взаємодія між машинами та додатки для розширеної реальності. Більша надійність: системи 6G будуть мати більшу надійність та стійкість, що дозволяє використовувати їх для критичних додатків, таких як системи здоров'я та автономних транспортних засобів.

Зокрема, визначено 5 ключових сценаріїв використання систем 6G. Додатки для обробки великих обсягів наукових даних - використання високошвидкісної передачі даних для наукових досліджень та обробки великих обсягів даних. Переадресація пакетів даних з урахуванням додатків - системи 6G можуть використовуватися для оптимізації маршрутизації даних в мережах з високою мобільністю та забезпечити ефективний обмін даними між пристроями. Порятунком при надзвичайних ситуаціях і катастрофах - системи 6G можуть бути використані для забезпечення швидкого та надійного зв'язку під час надзвичайних ситуацій та катастроф. Соціалізований Інтернет речей - системи 6G можуть підтримувати більш широку мережу з'єднань між пристроями, що дозволить створити соціальні мережі між об'єктами Інтернету речей та підтримувати машинне навчання та інші ШІ застосування. Зв'язок і обмін широко розподіленими даними, моделями і знаннями в області ШІ - системи 6G можуть бути використані для обміну даними, моделями та знаннями між різними пристроями, що дозволяє збільшити точність та ефективність ШІ алгоритмів.

Основні тенденції розвитку 6G передбачають підтримку вертикалей (тобто використання в різних галузях, таких як медицина, автомобільна

промисловість, промисловість 4.0), підтримку різних типів мережевих архітектур, широке використання віртуалізації, підтримку мільйонних зв'язків, зв'язок на основі даних і мережі зі штучним інтелектом і машинним навчанням. Крім того, співпраця між різними галузями та секторами стане основним рушієм у розвитку бездротових систем 6G.

Досліджено технічні виклики пов'язані з 6G. Низька затримка зв'язку E2E та висока пропускна здатність в надщільних мережах (UDN) - це два основних виклики для 6G. Також, різноманітне розгортання мережі, гнучкість з використанням розподілених систем по всій мережі від периферії до ядра, ефективний зв'язок і мережі на основі ШІ або МН, економічно ефективні мережеві рішення для сталого розвитку суспільства, безперешкодне підключення наземних, супутникових мереж і мереж на базі БПЛА, управління мобільністю в периферійних мережах, віртуалізація мереж і хмарні технології, нова стратегія використання спектра між неліцензованими і ліцензованими діапазонами і нові технології фізичного рівня, такі як ТГц-зв'язок, розподілений масивний МІМО також є важливими технічними викликами.

Отже, багато технологій 5G можуть бути перенесені на системи 6G і використовуватися як базові технології, що дозволяють розширювати межі майбутніх систем зв'язку. Зокрема, технології Massive МІМО, багатокористувацький МІМО, багаторівневий QAM, OFDM, багат шаровий підхід, високоефективні коди з декодуванням до степеня і багато інших можуть бути використані в системах 6G для підвищення пропускної здатності, зменшення затримок, забезпечення якості обслуговування та збільшення спектральної ефективності. Проте, також будуть потрібні нові технології, щоб відповісти на нові виклики, що виникають у системах 6G. Для систем 6G передбачається потреба у більш широкій смузі частот, ніж для систем 5G. Це пов'язано з тим, що високі частоти мають великий потенціал для передачі великих обсягів даних з високою швидкістю. Проте, високочастотні смуги також мають більш обмежену дальність поширення сигналу та меншу проникливість у будівлі та інші перешкоди. Тому наступна генерація мереж повинна забезпечувати не тільки широку смугу частот, але й більшу дальність зв'язку та підвищену ефективність в умовах завад.

Визначено, що діапазони частот систем 6G можуть починатись від 100 ГГц і вище, що є значно вище, ніж максимальні частоти, які використовуються

в 5G (до 52,6 ГГц). Це дає можливість досягати високої пропускної здатності, низької затримки та підвищеної місткості мережі. Однак, використання таких високих частот може призвести до проблем зі зв'язком, оскільки вони відносно швидко затухають на відстані і зазнають значних втрат від перешкод, таких як стіни будівель та дерева. Тому для досягнення максимальної ефективності мережі 6G необхідно використовувати різноманітні технології, такі як масивні антени, розподілена обробка сигналів.

Розглянуто основні перевагами терагерцового зв'язку. Величезна пропускна здатність: Терагерцові хвилі мають високу частоту і коротку довжину хвилі, що дозволяє передавати велику кількість інформації за короткий час. Це робить терагерцовий зв'язок особливо привабливим для використання у високошвидкісних мережах передачі даних, таких як відео-стрімінг і мережі Інтернету речей. Мініатюрні антени: Терагерцовий зв'язок вимагає використання дуже малих антен, що дозволяє використовувати його в малих пристроях, таких як смартфони, ноутбуки та інші пристрої. Проникнення через непровідні матеріали: Терагерцові хвилі можуть проникати через непровідні матеріали, такі як одяг, дерево, пластик, кераміка і папір. Це дозволяє використовувати терагерцовий зв'язок для комунікації в середовищах, де інші технології не працюють. Мінімальний вплив на організм людини: Терагерцовий зв'язок має мінімальний вплив на організм людини. Це означає, що він безпечний для використання в будь-якому середовищі. Отже, терагерцовий зв'язок має численні переваги, які роблять його привабливим для використання в різних областях, включаючи телекомунікації, медицину, безпеку та інші.

Розглянуто основні переваги використання відкритого радіочастотного діапазону (O-RAN) для мобільних операторів. Нижча вартість мережевого обладнання: O-RAN забезпечує мобільним операторам можливість використання змішаних компонентів різних виробників, що дозволяє знизити вартість мережевого обладнання і підтримки мережі. Ширша адаптація: O-RAN дозволяє мобільним операторам більш гнучко використовувати мобільне обладнання. Основні переваги O-RAN включають нижчу вартість мережевого обладнання, більшу адаптацію, вищу продуктивність мережі, вищу інтегрованийність і кращу безпеку. O-RAN - це відкритий стандарт для побудови мобільних мереж на базі програмного забезпечення, який дозволяє

операторам замінювати традиційне закрите обладнання на мережеве обладнання з відкритими інтерфейсами. Це дозволяє мобільним операторам змінювати обладнання та додавати нові функції до мережі без необхідності заміни всієї мережі. Крім того, це дозволяє операторам знизити вартість мережевого обладнання і підвищити ефективність мережі. Вища продуктивність мережі: O-RAN може допомогти мобільним операторам забезпечити більш високу продуктивність мережі, зокрема шляхом розподілу завдань між різними компонентами мережі і збільшенням швидкості передачі даних. Вища інтероперабельність: O-RAN підтримує використання різних компонентів мережі різних виробників, що забезпечує вищу інтероперабельність і дозволяє мобільним операторам з легкістю змінювати склад компонентів мережі відповідно до змінних потреб. Краща безпека: O-RAN забезпечує більш високий рівень безпеки, зокрема шляхом використання відкритих стандартів для забезпечення безпеки мережі і протоколів. Отже, використання відкритого радіочастотного діапазону (O-RAN) дозволяє мобільним операторам забезпечити більш гнучкий підхід до мережевого проектування і підтримки мережі.

Визначено, що мережі, орієнтовані на стільники, мають певні обмеження в забезпеченні якісного зв'язку у рухомому транспорті або в зоні перепадів між макро- та мікросередовищами. Однак, мережі, орієнтовані на користувача, зазвичай працюють в діапазоні частот, які є менш залежними від відстані між користувачем і базовою станцією, і можуть забезпечувати кращий зв'язок у зоні переходів між макро- та мікросередовищами. Крім того, такі мережі здатні автоматично вибрати найкращу доступну лінію зв'язку для користувача, що дозволяє підтримувати якість зв'язку на високому рівні навіть в умовах руху.

Визначено, що інтегрована мережа між наземними та стільниковими мережами дійсно може підвищити цінність мереж 6G. Інтеграція цих мереж дозволить створити більш гнучку та ефективну мережеву інфраструктуру, що зможе забезпечувати широкий спектр послуг і додаткові можливості для мобільних користувачів. Наземні мережі зазвичай використовуються для передачі великих обсягів даних та надання послуг з низькою затримкою. Стільникові мережі, з іншого боку, забезпечують мобільність та широкий охоплюють районів. Інтеграція цих мереж може дозволити використовувати переваги обох мереж, забезпечуючи високу пропускну здатність та низьку

затримку, а також мобільність та широке охоплення зони покриття. Крім того, інтеграція мереж може забезпечити більш ефективне використання ресурсів мережі. Наприклад, можна забезпечити краще використання різних радіочастотних діапазонів та знизити витрати на інфраструктуру, підтримку мережі та обслуговування користувачів. Таким чином, інтеграція наземних та стільникових мереж може підвищити цінність мереж 6G, забезпечуючи більш гнучку та ефективну мережеву інфраструктуру з широким спектром послуг та додатковими можливостями для мобільних користувачів.

Розглянуте кодування каналів є важливою частиною розробки мереж 6G, оскільки воно дозволяє забезпечити високу якість передачі даних. Багатокористувацькі канали використовуються для підвищення ефективності використання ресурсів мережі і забезпечення кращої співпраці між користувачами. Недвійкове LDPC і турбо-кодування є популярними методами кодування, які забезпечують високу ефективність кодування і дозволяють досягнути низької помилковості передачі. Крім того, передача кодових слів короткої довжини є важливою для забезпечення низької затримки і високої пропускної здатності. Нові модуляції і форми сигналів також дослідженні для забезпечення високої пропускної здатності і низької затримки. Наприклад, використання мультиплексування сигналів може допомогти забезпечити високу пропускну здатність, а використання нових форм сигналів, таких як OFDM, може допомогти забезпечити низьку затримку. Загалом, дослідження в галузі кодування каналів і модуляції сигналів є ключовими для розробки ефективних мереж 6G.

Розглянуто трансивер BackCom, який споживає дуже мало енергії порівняно зі звичайними трансиверами і має дуже низьку складність архітектури, що робить його ідеальним для зв'язку з Інтернетом речей (IoT). IoT вимагає використання великої кількості сенсорів та інших розумних пристроїв, які мають обмежену енергопотребу та обмежені ресурси. Трансивер BackCom може ефективно працювати з цими обмеженнями, забезпечуючи стабільний та надійний зв'язок з мінімальним споживанням енергії.

Досліджена програмована метаповерхня, що складається з елементів, розмір яких значно менше довжини хвилі, що проходить через цю структуру. Для бездротового зв'язку програмовані метаповерхні можуть використовуватись для покращення каналного середовища, зменшення втрат

сигналу та підвищення ефективності передачі даних. Це досягається за допомогою маніпулювання електромагнітними полями, що проходять через програмовану метаповерхню. Шляхом зміни форми, розміру і розташування елементів програмованої метаповерхні можна контролювати властивості проходження електромагнітних хвиль. Таким чином, програмовані метаповерхні можуть допомогти забезпечити більш стабільний і швидкий бездротовий зв'язок, що є важливим для розвитку таких технологій, як Інтернет речей, де велика кількість пристроїв повинна бути з'єднана в одну мережу.

Досліджено мережі 6G із більш гнучким розподіленням спектру за рахунок використання не тільки спектру, але й часу та інших мережевих ресурсів. Це може бути досягнуто за допомогою нових технологій, таких як програмована метаповерхня і мережеве управління ресурсами (NRM). Для забезпечення більш гнучкого розподілу спектру, у 6G можуть бути використані нові методи, такі як деякі форми неортогонального частотного розміщення (NFT), які дозволяють кільком користувачам використовувати один і той же канал без взаємних перешкод. Також можливо використання інших технологій, таких як когнітивне радіо, що дозволяє мережі динамічно реагувати на зміни у середовищі і адаптуватися до потреб користувачів.

Розглянуто особливості розподілу мережі на сегменти, який став важливим елементом системи 5G для підтримки різних викликів мережевого трафіку та забезпечення різних рівнів сервісу для різних користувачів. Проте, системи 6G зосередяться на ще більш гнучкому та ефективному розподілі мережі на сегменти, з використанням технологій віртуалізації та контейнерів. Це дозволить забезпечити більш ефективне використання ресурсів мережі, більш точне розподілення трафіку та забезпечення кращого рівня сервісу для кожного користувача, незалежно від його місцезнаходження. Крім того, віртуалізація дозволить забезпечити більш простий та швидкий доступ до мережевих ресурсів та забезпечить швидку та ефективну реакцію на змінні вимоги користувачів.

Використання ШІ може допомогти вирішувати проблеми з підвищенням продуктивності, покращенням безпеки та управлінням ресурсами мережі. У системах 6G передбачається використання алгоритмів ШІ для автоматизації та покращення управління різними аспектами мережі, такими як адаптація до змінних умов, оптимізація використання ресурсів та виявлення і запобігання

відмова в мережі. Прикладами застосування алгоритмів ШІ в системах 6G є визначення оптимальних маршрутів, планування використання ресурсів мережі та автоматичне управління мережевими обладнаннями.

Обґрунтовано корисність алгоритмів ШІ та МН для оптимізації мережі 6G та покращення її продуктивності. Наприклад, алгоритми ШІ можуть бути використані для автоматичного управління мережею та оптимізації її ресурсів, в той час як алгоритми МН можуть бути використані для покращення швидкості передачі даних та зменшення затримок в мережі. Також, алгоритми ШІ та МН можуть бути застосовані для розробки нових сервісів в мережі 6G, таких як автоматизовані системи управління транспортом, медичні системи дистанційного моніторингу та багато інших.

Застосування алгоритмів ШІ та МН дозволяє знайти оптимальне поєднання апаратного та програмного забезпечення для покращення продуктивності мереж 6G. Крім того, ці алгоритми дозволяють системам самооптимізуватися та самонавчатися на основі зібраних даних, що забезпечує більш ефективну роботу мереж та розробку нових сервісів з урахуванням потреб користувачів. Отже, використання алгоритмів ШІ та МН в системах 6G може значно покращити їх продуктивність та забезпечити більш ефективне використання ресурсів.

Розглянуто сценарій використання алгоритмів ШІ та МН в системах 6G. На першому етапі алгоритми ШІ та МН можуть використовуватися як компоненти в ланцюжку блоків приймально-передавальних пристроїв, щоб покращити продуктивність та ефективність. На останньому етапі можливе заміщення обробки на фізичному рівні обробкою на основі МН для ще більшої оптимізації та ефективності мережі.

Досліджено, що алгоритми ШІ та МН можуть бути використані для оптимізації розподілу ресурсів мережі, що дозволить забезпечити кращу продуктивність та якість обслуговування користувачів. Також вони можуть бути застосовані для планування передачі даних в мережі, агрегації несучих сигналів для підвищення пропускної здатності та ефективності, а також для забезпечення плавного хендоверу між базовими станціями при переміщенні користувачів в мережі.

Показано, що алгоритми ШІ та МН можуть бути корисними на мережевому рівні для різних функцій. Наприклад, вони можуть допомогти в

знаходженні оптимального шляху для передачі даних, виборі оптимальних обслуговуючих осередків, прогнозуванні мережевого трафіку, виявленні несправностей в мережі, класифікації мережевого трафіку та забезпеченні належної якості обслуговування. Алгоритми ШІ та МН можуть забезпечити автоматизоване управління мережею і зробити його більш ефективним та точним.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. R. Li, Network 2030: Market drivers and prospects. in Proceedings of the First International Telecommunications Union (ITU-T) Workshop on Network 2030 (October 2018)
2. ITU-T, Network 2030: A Blueprint of Technology, Applications, and Market Drivers toward the Year 2030 (November 2019)
3. ITU-T, FG NET-2030 Technical Report on Network 2030. Additional Representative Use Cases and Key Network Requirements for Network 2030 (June 2020)
4. K.L. Lueth, State of the IoT 2018: number of IoT devices now at 7B—market accelerating. IoT Analytics (August 2018)
5. T. Nakamura, 5G evolution and 6G. in International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT) (2020), pp. 1–1. <https://doi.org/10.1109/VLSI-DAT49148.2020.9196309>
6. C. Liaskos, S. Nie, A. Tsioliaridou, A. Pitsillides, S. Ioannidis, L. Akyildiz, A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces. *IEEE Commun. Mag.* 56(9), 162–169 (2018)
7. W. Tang, X. Li, J.Y. Dai, S. Jin, Y. Zeng, Q. Cheng, T.J. Cui, Wireless communications with programmable metasurface: transceiver design and experimental results. *J. China Commun.* 16(5), 46–61 (2019)
8. H. Ye, G.Y. Li, B. Juang, Power of deep learning for channel estimation and signal detection in OFDM systems. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 7(1), 114–117 (2018)
9. H. Ye, G.Y. Li, B.H. Juang, Power of deep learning for channel estimation and signal detection in OFDM systems. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 7(1), 114–117 (2018)
10. H. Huang, Y. Song, J. Yang, G. Gui, F. Adachi, Deep-learning-based millimeter-wave massive MIMO for hybrid precoding. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 68(3), 3027–3032 (2019)
11. F. Aoudia, J. Hoydis, End-to-end learning of communications systems without a channel model. arXiv:1804.02276 (2018)
12. J. Huang, C.-X. Wang, L. Bai, J. Sun, Y. Yang, J. Li, O. Tirkkonen, M. Zhou, A big data enabled channel model for 5G wireless communication systems. *IEEE Trans. Big Data* (2019) (in press)
13. R. He, B. Ai, A.F. Molisch, G.L. Stuber, Q. Li, Z. Zhong, J. Yu, Clustering enabled wireless channel modeling using big data algorithms. *IEEE Commun. Mag.* 56(5), 177–183 (2018)

14. S. Rajendran, W. Meert, D. Giustiniano, V. Lenders, S. Pollin, Deep learning models for wireless signal classification with distributed lowcost spectrum sensors. *IEEE Trans. Cognitive Commun. Netw.* 4(3), 433–445 (2018)
15. T.J. O’Shea, T. Roy, T.C. Clancy, Over-the-air deep learning based radio signal classification. *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.* 12(1), 168–179 (2018)
16. H. He, C.-K. Wen, S. Jin, G.Y. Li, Deep learning-based channel estimation for beamspace mmWave massive MIMO systems. *IEEE Wirel. Commun. Lett.* 7(5), 852–855 (2018)
17. H. Tang, J. Wang, L. He, Off-grid sparse Bayesian learning based channel estimation for mmWave massive MIMO uplink. *IEEE Wireless Commun. Lett.* 8(1), 45–48 (2019)
18. H. Kim, *Design and Optimization for 5G Wireless Communications* (Wiley, 2020). ISBN 9781119494553
19. H. Kim, Y.H. Jiang, R. Rana, Communication algorithms via deep learning. <https://arxiv.org/abs/1805.09317> (2018)
20. O. Shental, J. Hoydis, Machine Learning: Learning to softly demodulate, in *IEEE Globecom Workshops 2019, HI, USA* (2019), pp. 1–7
21. E. Björnson, J. Hoydis, L. Sanguinetti, *Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency* (Now Publishers, 2018). <https://doi.org/10.1561/20000000093>
22. H. P. Tauqir, A. Habib, Deep learning based beam allocation in switched-beam multiuser massive MIMO systems, in *2019 Second International Conference on Latest trends in Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT)* (2019) pp. 1–5
23. Y. Wang, S. Member, M. Liu, Data-driven deep learning for automatic modulation. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 68(4), 4074–4077 (2019)
24. J. Shi, W. Wang, X. Yi, X. Gao, G.Y. Li, Robust precoding in massive MIMO: a deep learning approach. [arXiv:2005.13134](https://arxiv.org/abs/2005.13134) (2020)
25. A.M. Elbir, K.V. Mishra, Joint antenna selection and hybrid beamformer design using unquantized and quantized deep learning networks. [arXiv:1905.03107](https://arxiv.org/abs/1905.03107) (pre-printed, 2019)
26. Y. Huang, P.P. Liang, Q. Zhang, Liang, A machine learning approach to MIMO communications, in *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (2018), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICC.2018.8422211>
27. D. Bega, M. Gramaglia, M. Fiore, A. Banchs, X. Costa-Perez, Deepcog: cognitive network management in sliced 5g networks with deep learning, in *Proceedings of the IEEE INFOCOM, Paris, France, 29 April–2 May 2019*

28. Y. Zhou, S. Peng, Y. Yao, Mac protocol identification using convolutional neural networks, in Proceedings of the 2020 29th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), Newark, NJ, USA. 1–2 May 2020, pp. 1–4
29. X. Zhang, W. Shen, J. Xu, Z. Liu, G. Ding, A mac protocol identification approach based on convolutional neural network, in Proceedings of the 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Nanjing, China, 21–23 October 2020, pp. 534–539
30. R. Mennes, M. Camelo, M. Claeys, S. Latre, A neural-network-based mf-tdma mac scheduler for collaborative wireless networks, in Proceedings of the 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Sydney, Australia, 18–21 May 2018, pp. 1–6
31. R. Mennes, M. Claeys, F. Figueiredo, I. Jabandžic, I. Moerman, S. Latré, Deep learning-based spectrum prediction collision avoidance for hybrid wireless environments. *IEEE Access* 7, 45818–45830 (2019)
32. Y. Zhang, J. Hou, V. Towhidlou, and M. Shikh-Bahaei, A neural network prediction based adaptive mode selection scheme in full-duplex cognitive networks. *IEEE Trans. Cog. Comm. Net.* 5, 540–553 (2019)
33. H. Kim, *Design and Optimization for 5G Wireless Communications* (Wiley, 2020). ISBN:9781119494553
34. H. Sun, X. Chen, Q. Shi, M. Hong, X. Fu, N.D. Sidiropoulos, Learning to optimize: training deep neural networks for interference management. *IEEE Trans. Signal Process.* 66(20), 5438–5453 (2018)
35. W. Lee, M. Kim, D. Cho, Deep power control: transmit power control scheme based on convolutional neural network. *IEEE Comm. Lett.* 22(6), 1276–1279 (2018)
36. K.I. Ahmed, H. Tabassum, E. Hossain, Deep learning for radio resource allocation in multi-cell networks (2018) arXiv:1808.00667v1
37. C. Wang, L. Ma, R. Li, T. S. Durrani, H. Zhang, Exploring trajectory prediction through machine learning methods. *IEEE Access* 7, 101 441–101 452 (2019)
38. Y. Koda, K. Yamamoto, T. Nishio, M. Morikura, Reinforcement learning based predictive handover for pedestrian-aware mmwave networks, in *IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)* (2018), pp. 692–697
39. L. Yan, H. Ding, L. Zhang, J. Liu, X. Fang, Y. Fang, M. Xiao, X. Huang, Machine learning based handovers for sub-6 ghz and mm wave integrated vehicular networks. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 18(10), 4873–4885 (2019)
40. S. Khosravi, H.S. Ghadikolaei, M. Petrova, Learning-based load balancing handover in mobile millimeter wave networks (2020). arXiv:2011.01420. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2011.01420>

41. D. Guo, L. Tang, X. Zhang, Y.-C. Liang, 'Joint optimization of handover control and power allocation based on multi-agent deep reinforcement learning. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 69(11), 13124–13138 (2020)
42. H. Kim, *Design and Optimization for 5G Wireless Communications* (Wiley, 2020), ISBN:9781119494553
43. R. Boutaba, M.A. Salahuddin, N. Limam, S. Ayoubi, N. Shahriar, F. Estrada-Solano, O.M. Caicedo, A comprehensive survey on machine learning for networking: evolution, applications and research opportunities. *J Internet Serv. Appl.* 9, 16 (2018). <https://doi.org/10.1186/s13174-018-0087-2>
44. R.M. AlZoman, M.J.F. Alenazi, A comparative study of traffic classification techniques for smart city networks. *Sensors* 21, 4677 (2021). <https://doi.org/10.3390/s21144677>
45. Васильківський, М., Нікітович, Д., & Болдирева, О. (2022). Керування доступом до інформаційних даних в інтелектуальних інфокомунікаційних мережах. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 5–17. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-1>
46. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Дослідження архітектури штучного інтелекту для інфокомунікаційних мереж 6G. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 62–70. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7>
47. Васильківський, М., Коломієць, А., & Грабчак, Н. (2022). Дослідження функціональних параметрів інфокомунікаційних мереж 6G. *Вісник Хмельницького національного університету*, (6), 46–52. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-46-52>
48. Васильківський, М., Коломієць, А., & Будащ, М. (2022). Оцінювання параметрів радіотрактів інфокомунікаційних систем 5G/6G. *Вісник Хмельницького національного університету*, (6), 53–60. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-53-60>
49. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Інтелектуальна оптимізація інфокомунікаційних мереж множинного доступу. *Вісник Хмельницького національного університету*, (6), 32–39. [https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6\(2\)-32-39](https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-32-39)
50. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

51. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14_nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html
52. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. . - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.znaytovar.ru/gost/2/GOST_12000374_SSBT_Opasnye_i_v.html
53. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://dnop.com.ua/dnaop/act3167.htm>
54. ДСанПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/derzhavni-sanitarni-pravila-i-normi-roboti-z-vizualnimi-disp-nor4881.html>
55. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>
56. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
57. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_praop_0_00-7_15-18_01_ua.php
58. Конституція України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР Про охорону праці Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>

ДОДАТКИ

Додаток А
(обов'язковий)
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав.кафедри ІКСТ ВНТУ,
докт. техн. наук, професор
В.М. Кичак
“__” _____ 2023 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
**ДОСЛІДЖЕННЯ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ 6G ІЗ ВБУДОВАНИМ ШТУЧНИМ
ІНТЕЛЕКТОМ**
08-32.МКР.002.00.000 ТЗ

Керівник роботи
к.т.н., доц. кафедри ІКСТ ВНТУ
Васильківський М.В.

Виконавець: ст. гр. ТКС-21мз
Якубівська Н.В.

Вінниця-2023

1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету від “20” 03 2023 року № 68 та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 30.01.2023 р.

Дата закінчення: 15.06.2023 р.

2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою даної магістерської кваліфікаційної роботи є дослідження і вдосконалення передових технологій зв'язку та обробки даних для надання швидкого, надійного та інтелектуального зв'язку між різними пристроями та системами.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- дослідження технологій побудови інфокомунікаційних мереж 6G;
- дослідження безпроводних мереж 6G із підтримкою штучного інтелекту;
- дослідження фізичного рівня безпроводної мережі зі штучним інтелектом;
- дослідження каналного рівня передачі даних зі штучним інтелектом;
- дослідження мережевого рівня з підтримкою штучного інтелекту.

Об'єктом дослідження є мобільна мережа та всі її складові компоненти, всі аспекти, пов'язані з використанням штучного інтелекту в мобільних мережах 6G, з метою покращення продуктивності, якості обслуговування, ефективності ресурсів, безпеки та інших характеристик мережі.

Предметом дослідження є нові алгоритми і методи для підтримки штучного інтелекту в мобільних мережах 6G.

Основними завданнями роботи є:

- дослідження технологій побудови інфокомунікаційних мереж 6G;

- безпроводні мережі 6G із підтримкою штучного інтелекту;
- дослідження фізичного рівня безпроводної мережі зі штучним інтелектом;
- дослідження каналного рівня передачі даних зі штучним інтелектом;
- дослідження мережевого рівня з підтримкою штучного інтелекту;
- аналіз економічної ефективності проведеної розробки;
- дослідження питань безпеки життєдіяльності.

Отримані в ході виконання результати використання штучного інтелекту в мережах 6G дозволять підвищити надійність, швидкодію з більшим обсягом передачі даних та зниженою затримкою порівняно з попередніми поколіннями мобільних мереж.

3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Робота базується на результатах переддипломної практики, яка виконувалась з 30.01.2023 р. по 10.03.2023р. Під час підготовки магістерської кваліфікаційної роботи будуть використані матеріали цієї практики.

Список використаних джерел розробки:

3.1 Положення про кваліфікаційні роботи на другому (магістерському) рівні вищої освіти у Вінницькому національному технічному університеті / Уклад. А. О. Семенов, Л. П. Громова, Т.В. Макарова, Сердюк О.В. – Вінниця: ВНТУ, 2021 – 60 с.

3.2 T. Nakamura, 5G evolution and 6G. in International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT) (2020), pp. 1–1. <https://doi.org/10.1109/VLSI-DAT49148.2020.9196309>

3.3 H. Kim, Design and Optimization for 5G Wireless Communications (Wiley, 2020). ISBN 9781119494553

3.4 J. Shi, W. Wang, X. Yi, X. Gao, G.Y. Li, Robust precoding in massive MIMO: a deep learning approach. arXiv:2005.13134 (2020)

3.5 Y. Zhou, S. Peng, Y. Yao, Mac protocol identification using convolutional neural networks, in Proceedings of the 2020 29th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC), Newark, NJ, USA. 1–2 May 2020, pp. 1–4

3.6 X. Zhang, W. Shen, J. Xu, Z. Liu, G. Ding, A mac protocol identification approach based on convolutional neural network, in Proceedings of the 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Nanjing, China, 21–23 October 2020, pp. 534–539

3.7 S. Khosravi, H.S. Ghadikolaei, M. Petrova, Learning-based load balancing handover in mobile millimeter wave networks (2020). arXiv:2011.01420. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2011.01420>

3.8 D. Guo, L. Tang, X. Zhang, Y.-C. Liang, ‘Joint optimization of handover control and power allocation based on multi-agent deep reinforcement learning. IEEE Trans. Veh. Technol. 69(11), 13124–13138 (2020)

3.9 H. Kim, Design and Optimization for 5G Wireless Communications (Wiley, 2020), ISBN:9781119494553

3.10 R.M. AlZoman, M.J.F. Alenazi, A comparative study of traffic classification techniques for smart city networks. Sensors 21, 4677 (2021). <https://doi.org/10.3390/s21144677>

3.11 Васильківський, М., Нікітович, Д., & Болдирева, О. (2022). Керування доступом до інформаційних даних в інтелектуальних інфокомунікаційних мережах. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 5–17. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-1>

3.12 Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Дослідження архітектури штучного інтелекту для інфокомунікаційних мереж 6G. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 62–70. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7>

3.13 Васильківський, М., Коломієць, А., & Грабчак, Н. (2022). Дослідження функціональних параметрів інфокомунікаційних мереж 6G. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 46–52. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-46-52>

3.14 Васильківський, М., Коломієць, А., & Будащ, М. (2022). Оцінювання параметрів радіотрактів інфокомунікаційних систем 5G/6G. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 53–60. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-53-60>

3.15 Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Інтелектуальна оптимізація інфокомунікаційних мереж множинного доступу. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 32–39. [https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6\(2\)-32-39](https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-32-39)

3.16 Кухарчук В.В., Ігнатенко О.Г., Обертюх Р.Р. Методичні вказівки до оформлення дипломних проектів (робіт) для студентів всіх спеціальностей.- В.: ВДТУ, 2002.

3.17 Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – В.: ВДТУ, 2003.

3.18 ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація, звіти у сфері науки і техніки.- К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016.

3.19 Бортник Г.Г., Васильківський М.В. Методичні вказівки до підготовки магістерських кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» усіх форм навчання.- Вінниця:ВНТУ, 2018.- 50 с.

4 ВИКОНАВЕЦЬ

Вінницький національний технічний університет, кафедра інфокомунікаційних систем і технологій, студент групи ТКС-21мз Якубівська Н.В.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Пропонується виконати дослідження методів вдосконалення майбутніх мереж, які забезпечать ще більшу продуктивність, надійність та зручність для користувачів. Зокрема, забезпечення розуміння можливих проблем та викликів, що виникають у мережах попереднього покоління та розроблення нових рішень для впровадження в мережах 6G.

Технічні вимоги, яким повинні відповідати дослідження, наступні:

- діапазон носійних частот – 100-300 ГГц;
- діапазон значення ширини смуги пропускання – 1-10 ГГц;
- діапазон пікових значень швидкості передавання даних (DL) – 20-200 Гбіт/с;
- діапазон пікових значень швидкості передавання даних (UL) – 10-100 Гбіт/с;
- діапазон значень швидкості передавання даних (DL) для одного користувача – 0,1-1 Гбіт/с;
- діапазон значень швидкості передавання даних (UL) для одного користувача – 50-500 Мбіт/с;
- діапазон значення затримки при передавання сигналів для одного користувача – 1-0,5 мс;
- діапазон значень затримки для групових сигналів керування – 20-5 мс;
- діапазон значень щільності підключення користувачів в мережі – 1-10 пристрій/м²;
- діапазон значень мобільності користувачів мережі – 500 – 1000 км/год;
- діапазон значень пропускнуої здатності мережі – 0,1 – 1 Тбіт/с;
- діапазон значень ємності мережі – 0,002 – 1 трильйон пристроїв.

При дослідженні мобільних мереж 6G з вбудованим штучним інтелектом бажано максимально використовувати стандартні технології та

протоколи. Це дозволяє забезпечити сумісність, взаємодію та інтеграцію з існуючими мережами та пристроями.

6 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
		початок	закінчення		
1.	Дослідження технологій побудови інфокомунікаційних мереж 6G, безпроводні мережі 6G із підтримкою штучного інтелекту	30.01.2023р.	10.02.2023р.	Проведений аналіз	Розділ 1 Вступ.
2.	Дослідження безпроводних мереж 6G із підтримкою штучного інтелекту	13.02.2023р.	20.02.2023р.	Розроблені топології	Розділ 2.
3.	Дослідження фізичного рівня безпроводної мережі зі штучним інтелектом	21.02.2023р.	10.03.2023р.	Розроблені структурні схеми	Розділ 3
4.	Дослідження каналного рівня передачі даних зі штучним інтелектом	13.03.2023р.	03.04.2023р.	Розроблені моделі пристроїв	Розділ 4
5.	Дослідження мережевого рівня з підтримкою штучного інтелекту	06.04.2023р.	05.05.2023р.	Алгоритми, характеристики і параметри	Розділ 5
6.	Аналіз економічної ефективності	08.05.2023р.	19.05.2023р.	Економічна частина МКР	Розділ 6
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	22.05.2023р.	31.05.2023р.	Частина ОТ та БНС	Розділ 7
8.	Оформлення пояснювальної записки (ПЗ) та графічної частини	01.06.2023р.	13.06.2023р.	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина

9.	Нормоконтроль, попередній захист, опонування МКР	14.06. 2023р.	15.06.2023р.	Позитивні відзиви	Відгуки
10.	Захист МКР ЕК		16.06.2023р.	Позитивний захист	Протокол ЕК

7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи будуть розроблені:

- архітектури сегментів мобільних мереж RAN, 5G vRAN та Open RAN;
- структура сегменту інтегрованої мережі 6G;
- схема передавача та приймача з використанням програмованої метаповерхні;
- структурні схеми блоків фізичного рівня на основі OFDM, блоків фізичного рівня з алгоритмом МН в приймачі та обробки на основі МН на фізичному рівні;
- структура наскрізного фізичного рівня на основі МН із підкріпленням;
- алгоритм класифікації інформаційного трафіку на основі машинного навчання;
- економічна частина МКР;
- розділ ОП та БНС;
- рекомендації щодо подальшого використання результатів дослідження мобільних мереж 6G з вбудованим штучним інтелектом.

Результати, отримані в процесі виконання даної роботи, будуть впроваджені в галузі телекомунікацій:

- Регіональний Центр експлуатації телекомунікаційної мережі України шляхом покращення комунікаційних сервісів, які можуть забезпечити високоякісну мультимедійну комунікацію, низьку затримку та покращену ефективність передачі даних. Наприклад, розробляйте інтерактивне відео та вдосконалені месенджери або віртуальні конференції;

- ПАТ “Укртелеком” шляхом впровадження нових інтерактивних додатків та сервісів, що використовують штучний інтелект. Наприклад, додатки віртуальної реальності, розумні асистенти або інтерактивні системи управління, які можуть забезпечити персоналізований досвід для користувачів.

Очікуваний техніко-економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень очікується підвищення продуктивності в різних галузях. Застосування штучного інтелекту для автоматизації та оптимізації процесів може покращити ефективність виробництва, обслуговування клієнтів та інших бізнес-операцій. Мобільні мережі 6G з вбудованим штучним інтелектом можуть забезпечити кращий користувацький досвід, завдяки швидкій передачі даних, низькій затримці та високоякісній комунікації. Це може позитивно позначитися на задоволенні користувачів та їх взаємодії з мобільними послугами та додатками.

8 МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ПОДАЮТЬ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ ТА ПІД ЧАС ЕТАПІВ

За результатами виконання МКР до ЕК подаються пояснювальна записка, графічна частина МКР, відзив і рецензія.

9 ПОРЯДОК ПРИЙМАННЯ МКР ТА ЇЇ ЕТАПІВ

Поетапно результати виконання МКР розглядаються керівником роботи та обговорюються на засіданні кафедри.

Захист магістерської кваліфікаційної роботи відбувається на відкритому засіданні ЕК.

10 ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ

Документація, що розробляється в процесі виконання досліджень повинна містити:

- архітектури сегментів мобільних мереж RAN, 5G vRAN та Open RAN;
- структуру сегменту інтегрованої мережі 6G;
- схему передавача та приймача з використанням програмованої метаповерхні;
- структурні схеми блоків фізичного рівня на основі OFDM, блоків фізичного рівня з алгоритмом МН в приймачі та обробки на основі МН на фізичному рівні;
- структуру наскрізного фізичного рівня на основі МН із підкріпленням;
- алгоритм класифікації інформаційного трафіку на основі машинного навчання;
- економічну частину та розділ БЖД і ЦЗ;
- рекомендації щодо подальшого використання результатів дослідження мобільних мереж 6G з вбудованим штучним інтелектом.

11 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

Додаток Б
(обов'язковий)

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Дослідження мобільних мереж 6G із вбудованим штучним інтелектом

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра інфокомунікаційних систем і технологій, факультет інформаційних електронних систем
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 99,58 % Схожість 0,42 %

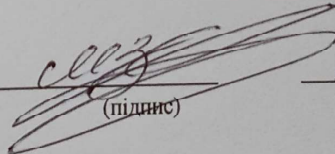
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

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

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

3. Виявлені у роботі запозичення недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або не містяться на вмісні спотворення тексту, що вказують на спробу приховування недобросовісних запозичень.

Особа відповідальна за перевірку

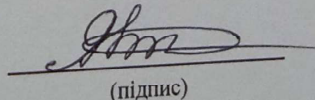

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

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

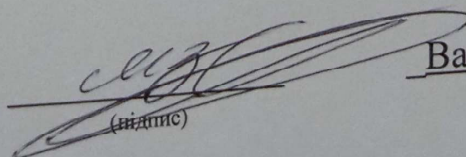
Автор роботи


(підпис)

Якубівська Н.В.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

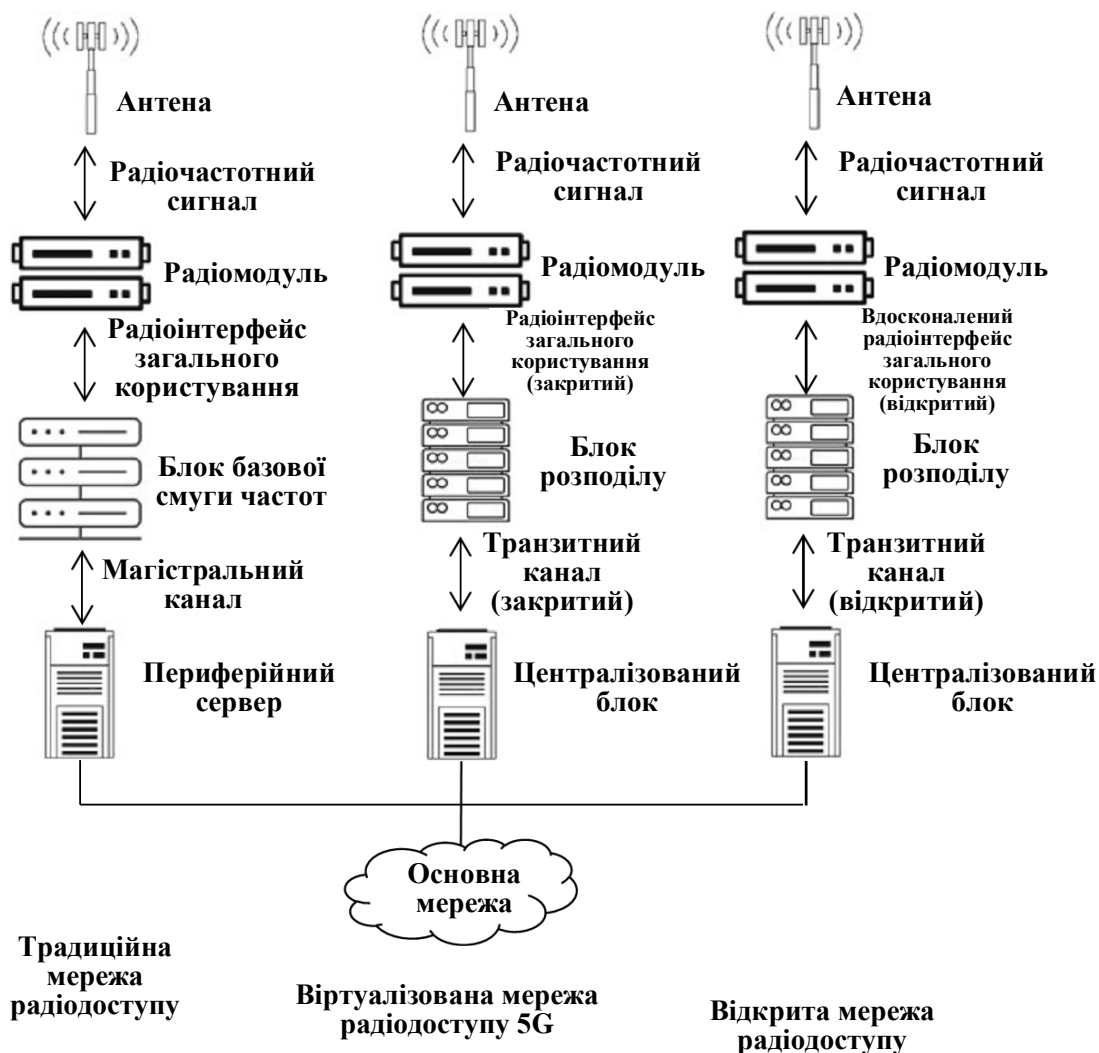

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

Додаток В
(обов'язковий)

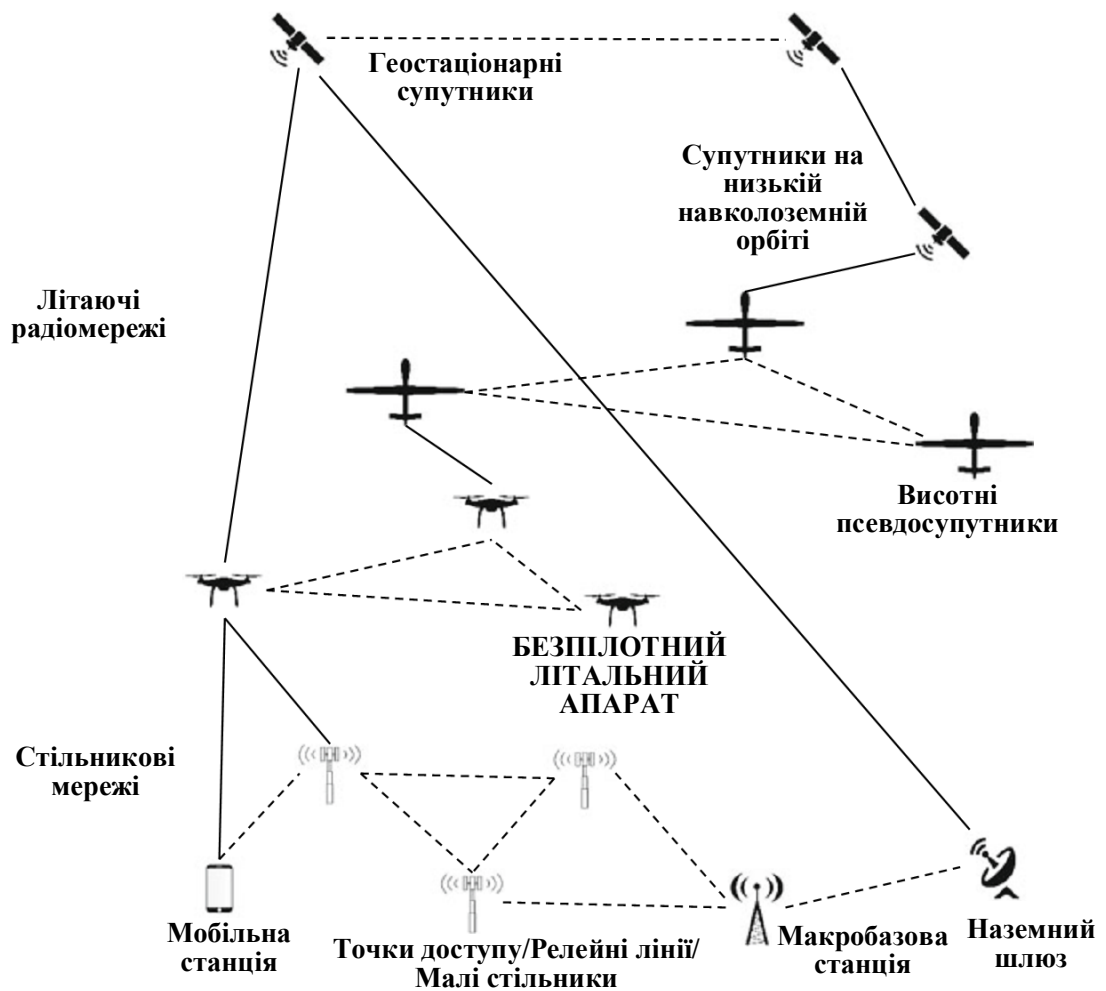
Архітектури сегментів мобільних мереж RAN, 5G vRAN та Open RAN



					08-32.МКР.002.00.001 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Якубівська Н.В.			Архітектури сегментів мобільних мереж RAN, 5G vRAN та Open RAN	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.						ВНТУ, гр. ТКС-21мз		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						

Додаток Г
(обов'язковий)

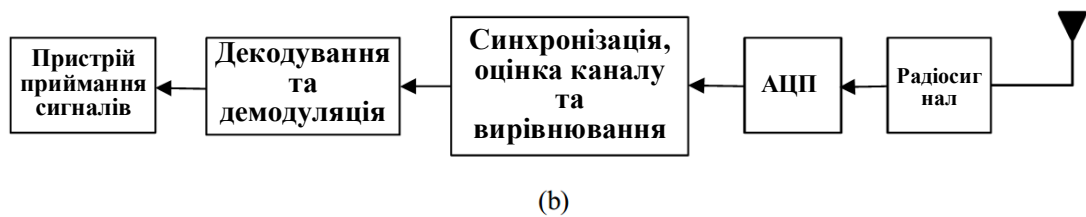
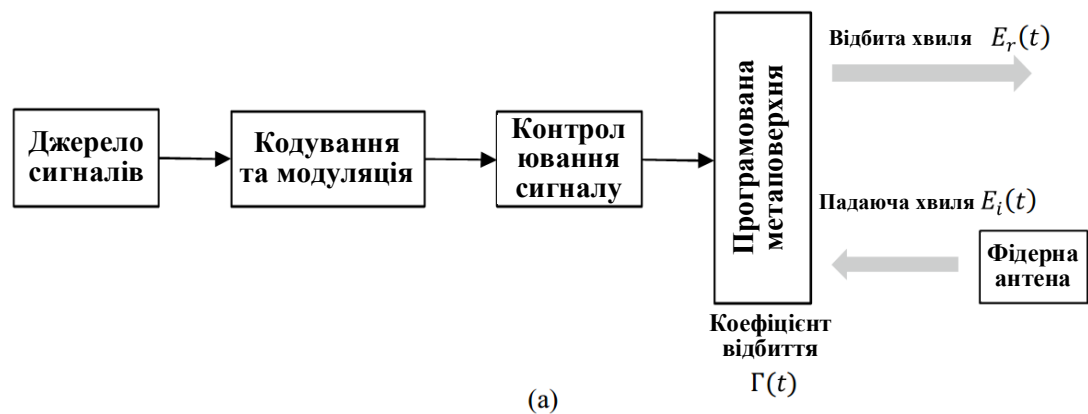
Структура сегменту інтегрованої мережі 6G



					08-32.МКР.002.00.001 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Якубівська Н.В.			Структура сегменту інтегрованої мережі 6G	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.								
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.				ВНТУ, гр. ТКС-21мз		

Додаток Д
(обов'язковий)

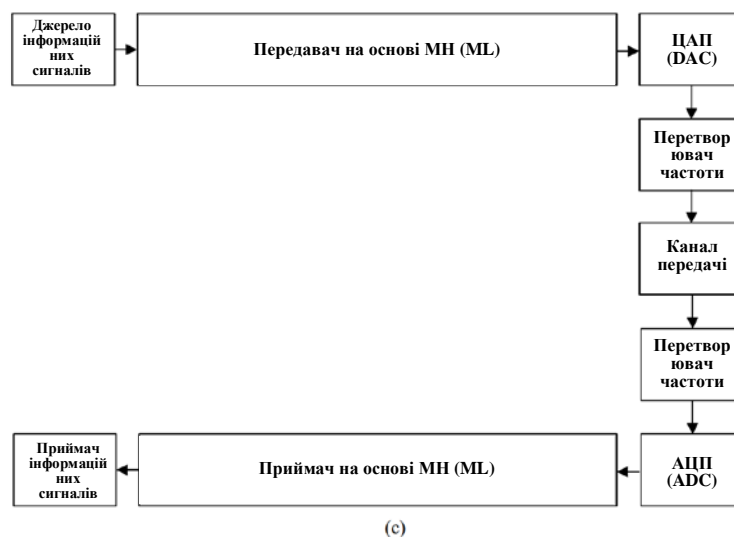
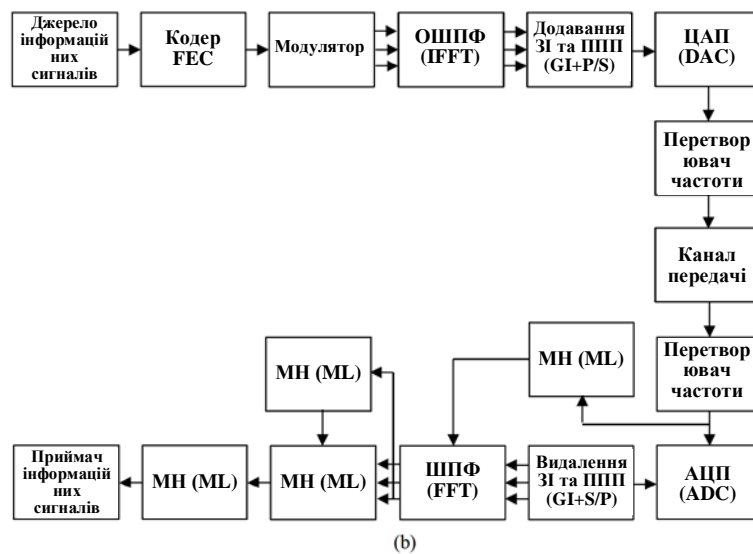
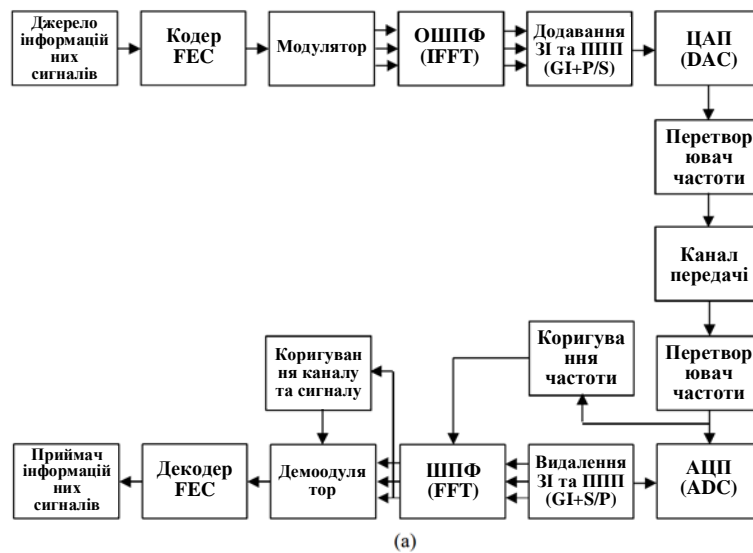
Схема передавача та приймача з використанням програмованої метаповерхні



					08-32.МКР.002.00.001 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Якубівська Н.В.			Схема передавача та приймача з використанням програмованої метаповерхні	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.						ВНТУ, гр. ТКС-21мз		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						

Додаток Е
(обов'язковий)

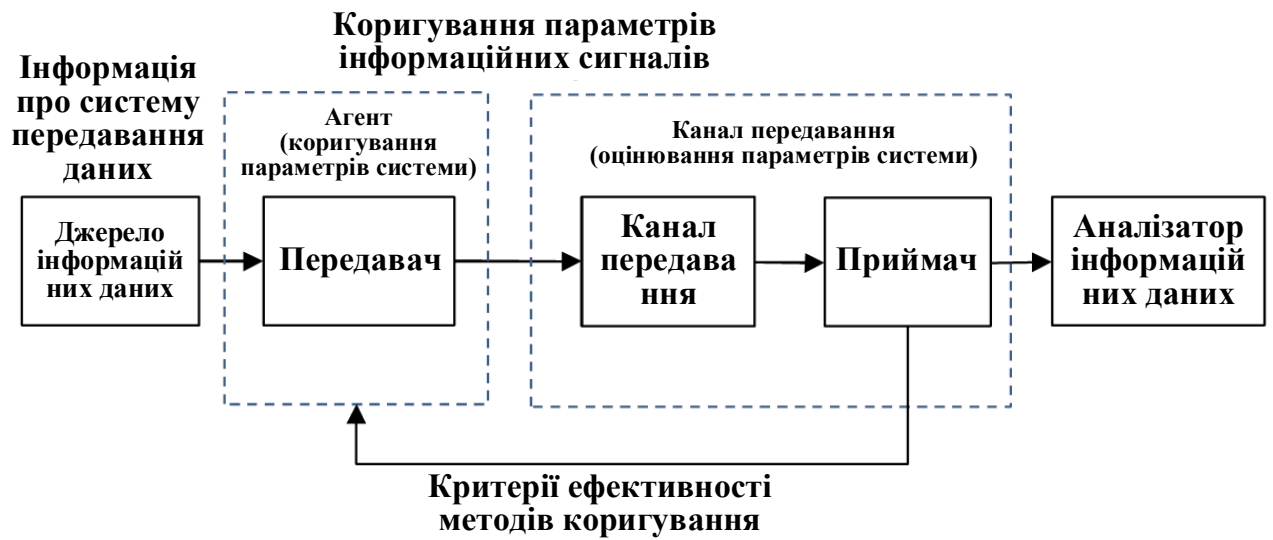
Структурні схеми блоків фізичного рівня на основі OFDM, блоків фізичного рівня з алгоритмом МН в приймачі та обробки на основі МН на фізичному рівні



					08-32.МКР.002.00.001 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Якубівська Н.В.			Структурні схеми блоків фізичного рівня на основі OFDM, блоків фізичного рівня з алгоритмом МН в приймачі та обробки на основі МН на фізичному рівні	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.						ВНТУ, гр. ТКС-21мз		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						

Додаток Ж
(обов'язковий)

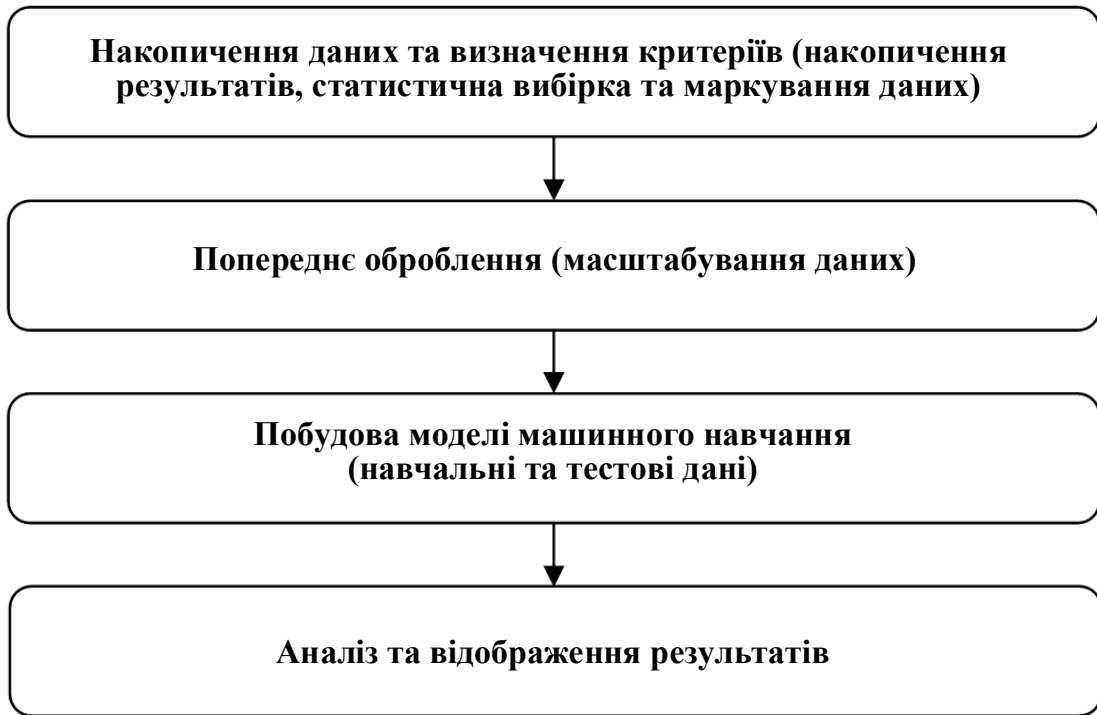
Структура наскрізного фізичного рівня на основі МН із підкріпленням



					08-32.МКР.002.00.001 Е8		
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Якубівська Н.В.			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.				1	1
Реценз.					ВНТУ, гр. ТКС-21мз		
Н. Контр.		Васильківський М.В.					
Затверд.		Кичак В.М.					
Структура наскрізного фізичного рівня на основі МН із підкріпленням							

Додаток К
(обов'язковий)

Алгоритм класифікації інформаційного трафіку на основі машинного навчання



					08-32.МКР.002.00.001 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Алгоритм класифікації інформаційного трафіку на основі машинного навчання	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Якубівська Н.В.					1	1
Перевір.		Васильківський М.В.				ВНТУ, гр. ТКС-21мз		
Реценз.								
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						