

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему:
**«Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного
навчання»**

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

Грабчак Н.В.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ІКСТ
Васильківський М.В.
«16» 12 2022 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС
Осадчук В.С.
«16» 12 2022 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІКСТ
Кичак В.М.
д.т.н., проф.
«16» 12 2022 р.

Інницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Назва спеціальності - 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність - 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Світньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

“14” 09 2022 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Грабчаку Назарію Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи «Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання»

Рівень роботи Васильківський Микола Володимирович, канд. техн. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом вищого навчального закладу від “14” 09 2022 року № 203

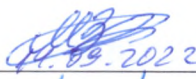


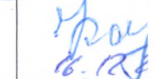
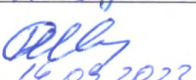
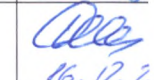
Строк подання студентом роботи 12 грудня 2022 року

Вихідні дані до роботи точність позиціонування в радіомережі – 1,5 см; технологія побудови мобільної мережі – 6G; швидкість передавання відеоданих у поділеному каналі мережі – 10 Гбіт/с; значення затримки передавання даних в мережі – 1 мс; значення надійності роботи засобів передавання даних – 99,9999 %; метод оптимізації процесу обробки даних та обслуговування каналів – машинне навчання; засіб підвищення продуктивності комутаційного обладнання мережі – штучний інтелект; швидкість передавання даних в груповому каналі мережі з вихідним об'єктом – 1 Гбіт/с; швидкість передавання даних в каналі доступу до мережі – 50 Мбіт/с.

Зміст текстової частини: аналіз глобального застосування мережі мобільного доступу; дослідження теоретичних основ штучного інтелекту та машинного навчання; математичне моделювання бездротових мереж великої ємності; обґрунтованість впровадження енергоефективних інфокомунікаційних систем.

Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) інтегрована телекомунікаційна система муніципального призначення; схема широкопосмугової інфокомунікаційної мережі доступу; структура розумної системи моніторингу здоров'я; схема взаємодії БПЛА із спеціалізованими системами доступу; структура RL та DRL у контексті бездротових стільникових мереж; структурна схема узагальненого бездротового каналу передавання.

6. Консультанти розділів роботи

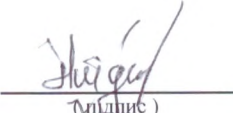
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	зав. при
Спеціальна частина	Васильківський М.В., доцент кафедри ІКСТ	 14.09.2022	 16.12.22
Економічна частина	Кавецький В.В. доцент кафедри ЕПВМ	 14.09.2022	 16.12.22
Охорона праці та безпека в ІС	Жембичова С.В. проф. кафедри БЖДЛБ	 14.09.2022	 16.12.22

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2022 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1.	Розробка технічного завдання	12.09.2022р.
2.	Аналіз глобального застосування мережі мобільного доступу	19.09.2022р.
3.	Дослідження теоретичних основ штучного інтелекту та машинного навчання	07.10.2022р.
4.	Математичне моделювання бездротових мереж великої ємності	28.10.2022р.
5.	Особливості впровадження енергоефективних інфокомунікаційних систем	18.11.2022р.
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	25.11.2022р.
7.	Охорона праці та безпека життєдіяльності	02.12.2022р.
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	09.12.2022р.
9.	Нормоконтроль МКР	12.12.2022р.
10.	Попередній захист МКР, опонування МКР	14.12.2022р.
11.	Захист МКР ЕК	19.12.2022р.

Студент


(підпис)

Грабчак Н.В.

Керівник роботи


(підпис)

Васильківський М.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.391

Грабчак Н. В. Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання – магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – Телекомунікаційні системи та мережі – Вінниця: ВНТУ 2022 р. 128 – стор., 31 – рис., 32 – табл., 33 – бібл. – українською мовою.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є дослідження способів підвищення продуктивності телекомунікаційних мереж доступу за допомогою технічних і програмних засобів штучного інтелекту та машинного навчання.

В роботі наведено результати досліджень технології 6G, яка дозволить інтегрувати всі типи доступу в одному мобільному телефоні, забезпечуючи плавне перемикання між послугами. Розглянуто нові варіанти використання мобільних мереж, такі як зондування та штучний інтелект, що формують нові показники якості інформаційної послуги – роздільну здатність зондування та ймовірність виведення.

Розглянуто процес проектування архітектури інфокомунікаційної системи 6G із врахуванням впливу моделей, алгоритмів та обладнання штучного інтелекту і машинного навчання на енергоспоживання для забезпечення економічної вигоди клієнтам з відповідними операційними витратами системи.

Ключові слова: інфокомунікаційна система, технологія 6G, штучний інтелект, безпілотний літальний апарат, ключовий показник ефективності, безпроводна мережа.

ANNOTATION

UDC 621.391

Hrabchak N. V. Access networks based on artificial intelligence and machine learning - master's thesis on specialty 172 - Telecommunications and radio engineering, educational program - Telecommunication systems and networks - Vinnytsia: VNTU 2022. 128 - p., 31 - fig. 32 - table, 33 - bibl. - in the Ukrainian language.

The purpose of the master's thesis is to research ways to improve the productivity of telecommunication access networks using technical and software tools of artificial intelligence and machine learning.

The work presents the results of research into 6G technology, which will allow integrating all types of access in one mobile phone, ensuring smooth switching between services. New options for the use of mobile networks, such as sensing and artificial intelligence, are considered, which form new indicators of the quality of the information service - the resolution of sensing and the probability of output.

The process of designing the architecture of the 6G information communication system is considered, taking into account the impact of models, algorithms and equipment of artificial intelligence and machine learning on energy consumption to provide economic benefits to customers with the corresponding operating costs of the system.

Keywords: information communication system, 6G technology, artificial intelligence, unmanned aerial vehicle, key performance indicator, wireless network.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	8
1 ГЛОБАЛЬНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ДОСТУПУ	14
1.1 Бездротовий широкосмуговий відкритий доступ до інформаційних послуг.....	15
1.2 Особливості застосування технології інтернет речей	18
1.3 Високоточне позиціонування та навігація в інфокомунікаційних мережах	19
1.4 Моніторинг земної поверхні в реальному часі	20
1.5 Повнофункціональна індустрія 4.0	20
1.6 Розумне місто та розумне життя.....	27
1.7 Висновки до розділу 1	33
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ.....	34
2.1 Фундаментальна теорія штучного інтелекту	34
2.2 Таксономія машинного навчання.....	37
2.3 Теоретико-інформаційний принцип глибокої нейронної мережі	40
2.4 Реалізації глибокої нейронної мережі.....	43
2.5 Теорія розподіленого штучного інтелекту	44
2.6 Теорія динамічної байєсівської мережі.....	50
2.7 Висновки до розділу 2	56
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗДРОВОТИХ МЕРЕЖ ВЕЛИКОЇ ЄМНОСТІ.....	57
3.1 Теорія електромагнітної інформації.....	57
3.2 Фізичний канал розповсюдження.....	59
3.3 Теорія семантичної комунікації.....	63
3.4 Теорія надвисокої роздільної здатності	69
3.5 Висновки до розділу 3	74

4 ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ	76
4.1 Енергоефективні комунікації та теорія обчислень	76
4.2 Теорія зеленого штучного інтелекту.....	79
4.3 Висновки до розділу 4	83
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	84
5.1 Оцінювання наукового ефекту.....	84
5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	88
5.2.1 Витрати на оплату праці.....	88
5.2.2 Відрахування на соціальні заходи	92
5.2.3 Сировина та матеріали.....	92
5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	94
5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт	94
5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт	95
5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень	96
5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей	98
5.2.9 Службові відрядження.....	99
5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації	100
5.2.11 Інші витрати.....	100
5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	101
5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	102
5.4 Висновок до розділу 5.....	103
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	105
6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	105
6.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця	105
6.1.2 Електробезпека приміщення.....	107
6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	108
6.2.1 Мікроклімат	108

	4
6.2.2 Склад повітря робочої зони.....	109
6.2.3 Виробниче освітлення.....	109
6.2.4 Виробничий шум.....	111
6.2.5 Виробничі випромінювання.....	111
6.2.6 Психофізіологічні фактори	112
6.3 Спеціальна та санітарна обробка при радіаційному забрудненні.....	113
6.4 Висновки до розділу 6	114
ВИСНОВКИ.....	115
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	117
ДОДАТКИ.....	120
Додаток А Технічне завдання	121
Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	122
Додаток В Інтегрована телекомунікаційна система муніципального призначення	123
Додаток Г Схема широкосмугової інфокомунікаційної мережі доступу	124
Додаток Д Структура розумної системи охорони здоров'я.....	125
Додаток Е Схема взаємодії БПЛА із спеціалізованими системами доступу....	126
Додаток Є Структури RL та DRL у контексті бездротових стільникових мереж	127
Додаток Ж Структурна схема узагальненого бездротового каналу передавання.....	128

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ADC – Аналого-цифровий перетворювач
AGV – Автоматизований керований автомобіль
AI – Штучний інтелект
AIaaS – Штучний інтелект як послуга
AMC – Адаптивна модуляція та кодування
ANC – Кодування аналогової мережі
ANN – Штучна нейронна мережа
APSK – Амплітудно-фазова маніпуляція
AR – Доповнена реальність
AWGN – Адитивний білий гаусів шум
B2B – Корпоративний сегмент, «бізнес для бізнесу»
BER – Коефіцієнт бітових помилок
BLER – Коефіцієнт блокових помилок
BN – Байєсівська мережа
BP – Поширення довіри
BPSK – Двійкова фазова маніпуляція
CA – Агрегація несучих частот
CAPL – Одночасна пасивна та активна локалізація
CDMA – Множинний доступ з кодовим поділом каналів
CEM – Моделювання задач електромагнетизму
CJT – Когерентна спільна передача
CN – Базова мережа, опорна мережа
CNN – Згорткова нейронна мережа
CU – Блок керування
D2D – Міжприладова взаємодія, зв'язок пристрій-пристрій
DAC – Цифроаналоговий перетворювач
DBN – Динамічна байєсовська мережа
DFT – Дискретне перетворення Фур'є

DLT – Технологія розподіленого реєстру (блокчейн)
DNN – Глибока нейромережа
DRL – Глибоке навчання з підкріпленням
DSS – Динамічне спільне використання спектру
E2E – Наскрізний
FEC – Пряма корекція помилок
FFT – Швидке перетворення Фур'є
FMCW – Неперервне випромінювання з частотною модуляцією
GFDM – Узагальнене мультиплексування з частотним поділом каналів
GPU – Графічний процесор
HMM – Прихована марківська модель
Holo-MIMO – Голографічний MIMO
IB – Вузьке місце інформаційного потоку
ICT – Інформаційні та комунікаційні технології
IDFT – Зворотне дискретне перетворення Фур'є
IDMA – Множинний доступ з чергуванням і поділом каналів
IFFT – Зворотне швидке перетворення Фур'є
IGMA – Множинний доступ з чергуванням сітки
IMT – Міжнародний мобільний зв'язок
InH – Точка доступу в приміщенні
KPI – Ключовий показник ефективності
LDPC – Код низької щільності з контролем парності
LNA – Малошумний підсилювач
M2M – Міжмашинна взаємодія, міжмашинні комунікації
MA – Множинний доступ
MAC – Керування доступом до середовища
MARL – Багатоагентне (розподілене) навчання з підкріпленням
MCS – Схема модуляції та кодування
MDP – Марківський процес прийняття рішень
MEC – Мобільні граничні обчислення

MIMO – Багатоканальний вхід, багатоканальний вихід

ML – Машинне навчання

MMSE – Мінімальна середньоквадратична помилка

mMTC – Поточковий зв'язок машинного типу

MR – Змішана реальність

NB-IoT – Широкопasmовий інтернет речей

NOMA – Неортогональний множинний доступ

NTN – Неназемна мережа

OTT – Надвисокий рівень, надання послуги поверх мережі мобільного зв'язку

OWC – Оптичний бездротовий зв'язок

PA – Підсилювач потужності

PAPR – Відношення пікового рівня потужності сигналу до середнього

PDMA – Множинний доступ з поділом за шаблоном

PSLR – Відношення пікових та бічних пелюсток

QAM – Квадратурна амплітудна модуляція

RL – Навчання з підкріпленням

RNN – Рекурентна нейромережа

RRC – Протокол керування радіоресурсами

RSMA – Множинний доступ з розширенням ресурсів

RTT – Тривалість прийому-передачі

SCL – Множинний доступ з розрідженим кодом

SDMA – Множинний доступ з просторовим поділом

SDN – Програмно-конфігурована мережа

STBC – Просторово-часове блочне кодування

SUL – Додаткові висхідні канали зв'язку

TDD – Дуплексний зв'язок з часовим поділом

TDL-C – Канал на основі лінії затримки з відводами

TDMA – Множинний доступ із часовим поділом каналів

UCN – Орієнтована на користувача мережа

ВСТУП

Актуальність теми. У багатьох сучасних інженерних галузях системи мають тенденцію організовуватися у більші мережі (такі як надмасивні МІМО і щільні мережі). Крім того, все більш важливою стає системна динаміка, оскільки при цьому потрібна швидка обробка в середовищах, що швидко змінюються. Виступаючи свого роду спільним знаменником, такі мережі тепер стикаються з проблемою, пов'язаною з необхідністю одночасно справлятися з зростаючим розміром системи (збільшення вузлів у мережах та збільшення суб'єктів, що взаємодіють з ними), підвищеним рівнем стохастичності (випадкові зміни в топології та випадковий розвиток середовища), а також з потребою в децентралізованій та самоорганізованій обробці (мережні вузли повинні бути автономними і здатні динамічно адаптуватися до середовища, що змінюється). Ці три аспекти є основними компонентами, необхідними для моделювання, аналізу та оптимізації продуктивності майбутніх мереж. Традиційні методи, що використовуються для вирішення подібних проблем у великих складних системах, включають пряме моделювання (метод Монте-Карло) або евристичні інструменти, такі як нейронні мережі або рої частинок. Однак вони мають ряд серйозних недоліків, наприклад вони не є математично стабільними і погано піддаються простій інтерпретації, внаслідок чого спрямовані на покращення та оптимізації системи або засновані на пробах та помилках, або просто неможливі. У результаті ці методи часто розглядаються як резервні рішення у випадках, коли математичні моделі не мають міцної основи.

Аналіз останніх досліджень. Розробка нових теоретичних інструментів дозволяють проводити систематичний, надійний та інтерпретований аналіз великих випадкових мереж. Ці інструменти повинні бути достатньо спільними, щоб охоплювати широкий спектр мережевих моделей, але водночас забезпечувати легку спеціалізацію для практичних мереж. Як буде детальніше показано нижче, для вирішення частини проблем, властивих цим великим системам, вже було визначено різні сучасні математичні інструменти у якості

потенційних кандидатів. Однак більшість цих інструментів все ще знаходяться на ранніх стадіях математичного опрацювання або тільки почали впроваджуватися в інженерні дослідження. З цих нових інструментів найбільш перспективними виявилися такі три: теорія випадкових матриць, зокрема теорія випадкових матриць великої розмірності [1], технічно є дослідження великомірних ермітових матриць з випадковими елементами. На початку 2000-х років у цій галузі спостерігався сплеск інтересу до бездротового зв'язку під час аналізу нових технологій тієї епохи – множинних антен та методів розширення спектру, математичні моделі яких були засновані на випадкових матричних каналах зв'язку. У той час як науковий прогрес у цій галузі продовжувався з 2000 по 2010 рік (на основі математичних результатів, отриманих до 2000 року), мало хто з дослідників розвивав математичні основи теорії випадкових матриць далі, ніж це було необхідно для вирішення складних проблем. Проте нещодавно у масивному MIMO і надмасивному MIMO з'явилися нові теоретичні інструменти, пов'язані з аналізом мереж бездротового зв'язку.

Теорія випадкових матриць спрямовано на вивчення спектральних властивостей (власних значень і підпросторів) матриць з випадковими елементами, розміри яких вважаються дуже великими. Подібно до того, як випадкові змінні або випадкові вектори кінцевого розміру демонструють детерміновані межі при досягненні великого набору вибірок цих змінних (в основному на основі закону великих чисел або центральної граничної теореми), спектральні заходи деяких моделей випадкових матриць демонструють детерміновану поведінку, коли розміри рядка та стовпця ростуть до безкінечності. Довгий час ця теорія залишалася прерогативою математиків, проте на початку 2000-х стало очевидним, що випадкові матриці можуть адекватно моделювати канали бездротового зв'язку, які є стохастичними та швидко змінюються за своєю природою [2]. Після кількох років роботи дослідникам бездротового зв'язку стало зрозуміло, що більшість моделей випадкових матриць, запропонованих математиками, або неадекватні, або занадто прості для ефективного вивчення найбільш реалістичних каналів зв'язку.

Друга хвиля досліджень почалася приблизно в 2010 році і мала на меті подальше вивчення математичного інструменту теорії випадкових матриць для конкретних потреб інженерів бездротового зв'язку. Останні досягнення в цій галузі принесли важливі нові результати в моделюванні, аналізі та оптимізації продуктивності численних бездротових каналів, таких як канали МІМО точка-точка з райсівським завмиранням [3], багатопроменеві канали МІМО [4], канали МІМО множинного доступу [5], передкодовані ширококомвні канали [6], канали зв'язку з унітарними прекодерами [7], багатоланкові канали [8] та мережі з одним/декількома осередками [9, 10]. Хоча ці результати іноді ґрунтуються на дуже складних системних моделях, вони представлені у відносно спрощеній формі та добре піддаються оптимізації. Істотним інгредієнтом, який вводиться теорією випадкових матриць, є наближення великої розмірності, що дозволяє ефективно аналізувати великі складні стохастичні системи з детермінованими величинами, відомими як детерміновані еквіваленти [11]. Компоненти великорозмірної системи вимірюються на основі кількості антен у бездротових пристроях, кількості користувачів в одному осередку або кількості осередків у цій мережі. Таким чином, теорія випадкових матриць визнана ефективним інструментом для аналізу багатьох локальних систем бездротового зв'язку, де «локальний» розуміється як «одномасштабний» (велика кількість антен, або кількість користувачів). Очікується, що завдяки додатковим узагальненим інструментам, таким як детерміновані ітераційні еквіваленти [12], теорія випадкових матриць стане адекватним інструментом для моделювання складних телекомунікаційних систем, в яких враховуються багато великорозмірних компонентів, що дозволяє уявити собі спільний аналіз на макроскопічному і мікроскопічному рівнях. Крім того, інструменти теорії випадкових матриць також справили враження на співтовариство обробки сигналів, запропонувавши інноваційні схеми детектування та оцінки (статистичного висновку), такі як технологія радарна МІМО, для обробки великих масивів сигналів [13]. Нарешті, було проведено дослідження з розробки децентралізованих алгоритмів для оптимізації продуктивності багатоосередкових мереж МІМО [14];

- децентралізована стохастична оптимізація. Другий цікавий інструмент – це нещодавно запропонована структура, що поєднує стохастичні апроксимації та алгоритми пліток (gossip algorithm) для децентралізованої стохастичної оптимізації. Походження децентралізованої стохастичної оптимізації можна простежити до роботи [15], в якій отримані методи виконання складних децентралізованих обчислень на потенційно великих кластерах процесорів. Однак початкова робота була обмежена тим фактом, що міжпроцесорний зв'язок має бути недорогим і незалежним від відстані між процесорами i , отже, незалежною від базової топології мережі. Паралельно з цим були розроблені децентралізовані консенсусні алгоритми для вирішення зовсім іншої проблеми: досягнення загального рішення [16] на взаємопов'язаному графі датчиків з низькими можливостями обробки та пам'яті. Класичним прикладом децентралізованих алгоритмів консенсусу є алгоритм досягнення консенсусу у розподіленій системі МІМО. Тобто, виходячи з міркувань, що кожна точка доступу в кластері виконує початковий вимір, постійно зберігає одне значення в пам'яті і може відправляти це значення тільки своєму найближчому сусідові, повинні бути розроблені швидкі алгоритми, щоб допомогти кластеру в кінцевому підсумку досягти загального рішення по середньому значення вихідних вимірів.

У разі топологічні міркування важливі властивостей здійсненності і збіжності алгоритмів. У роботі [17] запропоновано децентралізовану обробку у великих взаємопов'язаних мережах з обмеженими комунікаційними можливостями. Цей підхід спрямований на вирішення загальномережевої проблеми, яку можна поділити на кілька незалежних підзавдань. Кожен мережевий вузол оптимізує своє власне підзавдання, а потім відправляє результат своєму найближчому сусідові (детерміновано або випадковим чином), таким чином досягається консенсус, в якому кожен вузол зрештою знає про вирішення проблеми. Серед різних розширень цих схем пропонуються деякі алгоритми, засновані на стохастичній апроксимації [18], яка передбачає, що кожен мережевий вузол має лише часткове знання інформації про підзавдання.

Децентралізована обробка вже була предметом практичних досліджень у розрахованих на багато користувачів мережах [19]. У децентралізованій МІМО різні проблеми, такі як максимізація загальної пропускної спроможності мережі, вимагають вирішення, в якому центральний об'єкт має повне уявлення про мережу. Через обмежені можливості обчислень та пам'яті, а також коротких діапазонів зв'язку точок доступу децентралізована обробка та алгоритми пліток також є важливими інгредієнтами для досягнення максимальної продуктивності щільних мереж. Зокрема, очікується, що такі децентралізовані алгоритми обробки та пліток стануть адекватною альтернативою теоретико-ігровим та навчальним підходам, які давно розглядаються у бездротовому зв'язку, незважаючи на те, що дослідники рідко наводять переконливі аргументи на користь їх використання у самоорганізованих мережах.

Слід зазначити, що теоретико-ігрові міркування, насамперед засновані на послідовності випробувань і зворотного зв'язку, часто вимагають від мережевих учасників прийняття неправильних рішень до того, як буде досягнуто очікувану рівновагу по Нешу. Якщо завдання оптимізації ставлять суворі обмеження між вузлами, теоретико-ігрові підходи часто призводять до алгоритмів, результати яких не можуть спочатку задовольняти обмеженням.

У міру того, як 6G продовжує розвиватися, починають з'являтися різні технології, які тісно пов'язані з теорією великомасштабних комунікацій, у тому числі щільна мережа, федеративне навчання, безсотовий масивний МІМО, орієнтований на користувача зв'язок, граничний зв'язок і розподілений МІМО.

Мета і завдання роботи. Метою даної магістерської кваліфікаційної роботи є дослідження способів підвищення продуктивності телекомунікаційних мереж доступу за допомогою технічних і програмних засобів штучного інтелекту та машинного навчання.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

1. Аналіз глобального застосування мережі мобільного доступу;
2. Дослідження теоретичних основ штучного інтелекту та машинного навчання;

3. Математичне моделювання бездротових мереж великої ємності;

4. Особливості впровадження енергоефективних інфокомунікаційних систем.

Об'єктом дослідження є інтелектуальні радіосистеми 6G.

Предметом дослідження є технології та математичні моделі, що дозволяють забезпечити високу продуктивність радіомереж доступу 6G.

Методи досліджень базуються на використанні: системного аналізу, методів теорії ймовірностей і математичній статистиці; теорії прийняття рішень, включаючи методи теорії важливості критеріїв; методах розробки програмно-апаратних систем.

Апробація роботи та її основні результати роботи проводилися на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2023)» у 2022 році.

Публікації результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні положення кваліфікаційної роботи висвітлені у 3 наукових публікаціях, зокрема 1 статті у фаховому журналі, що входить до переліку ВАК України та 2 тезах науково-практичної конференції.

1 ГЛОБАЛЬНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ДОСТУПУ

Від бездротової мережі наступного покоління ми очікуємо глобального покриття поверхні Землі, щоб користувачі та підключені речі могли отримати доступ до інтернету у будь-якому місці та у будь-який час. При впровадженні технології 6G наземні мережі зможуть об'єднуватися з вузлами неназемного доступу, такими як супутники, дрони, висотні платформи (HAP) та автомобілі. Це об'єднання сформує глобальну інтегровану мережу зв'язку, яка забезпечить безшовне покриття, що охоплює сушу, море та небо, як показано на рис. 1.1. Крім того, ця інтеграція дозволить користувачам підключатися до мережі 6G незалежно від того, чи йдуть вони пішки, їдуть автомобілем або летять на борту літака, і забезпечить безперебійне обслуговування, навіть якщо якась частина інфраструктури несправна або пошкоджена.

При цьому наземні та неназемні мережі 6G будуть повністю інтегровані на системному рівні, забезпечуючи конвергенцію послуг, радіоінтерфейсів, мереж та пристроїв користувача. Органічно поєднуючи ці два середовища доступу в одну конвергентну багаторівневу гетерогенну мережу, що охоплює всю земну кулю, технологія 6G надасть користувачам однакове обслуговування. Забезпечення глобальної доставки мобільних послуг стане важливим аспектом розвитку мережі 6G.

Інтегрована мережа 6G розширить спектр послуг, що надаються. Наприклад, за рахунок інтеграції наземних та неназемних мереж 6G забезпечить широкосмуговий зв'язок та послуги IoT у регіонах та областях, де відсутнє покриття наземної мережі, включаючи віддалені ферми, і навіть на борту кораблів та літаків. Крім того, 6G сприятиме появі нових застосувань, таких як високоточне позиціонування об'єктів комбінованими засобами супутникових та наземних систем та високоточна зйомка земної поверхні в реальному часі для сільського господарства.

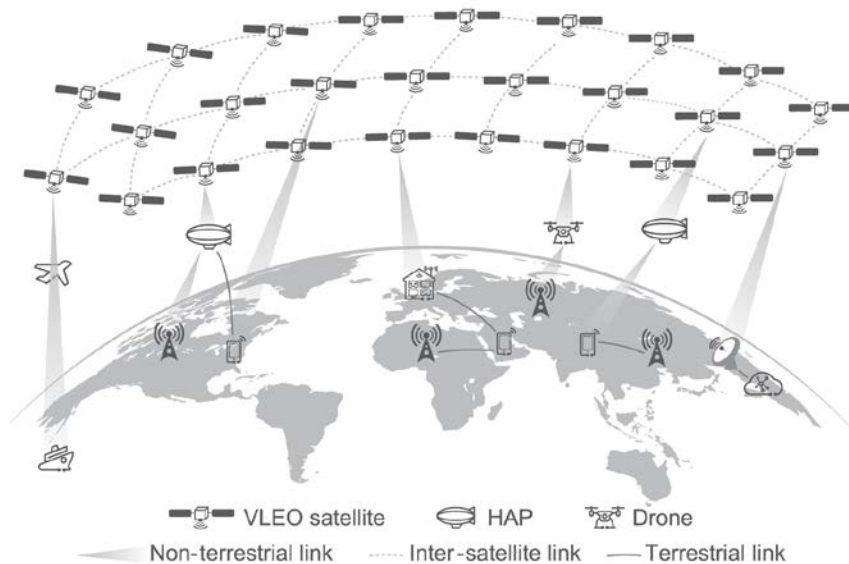


Рисунок 1.1 – Глобальне інтегроване покриття мережі 6G

1.1 Бездротовий широкопasmовий відкритий доступ до інформаційних послуг

Інтегрована мережа 6G забезпечить 3D-покриття, усуваючи всі прогалини у покритті по всьому світу. Наприклад, це дозволить людям, які мешкають у віддалених та безлюдних районах, на борту транспортних засобів, таких як кораблі та літаки, а також у морі на нафтовидобувних платформах, підключатися до інтернету через високошвидкісні бездротові з'єднання. Користувачі зможуть підключатися до мережі 6G через наземні та неназемні канали, використовуючи той самий мобільний телефон або портативний пристрій у будь-якому місці та в будь-який час. Крім того, інтегрована мережа 6G буде стійкою до стихійного лиха, а це означає, що вона може забезпечити підключення для служб швидкого реагування та надання допомоги при лихах.

Сьогодні приблизно 3,7 млрд. людей все ще не мають навіть базового доступу до інтернету [1]. Більшість із них проживають у сільських та віддалених районах, де наземні та неназемні мережі могли б працювати разом для надання широкопasmового доступу, як показано на рис. 1.2. Для організації

широкопasmового доступу на морі застосовуватиметься інтеграція широкопasmових супутників, корабельних та наземних станцій.

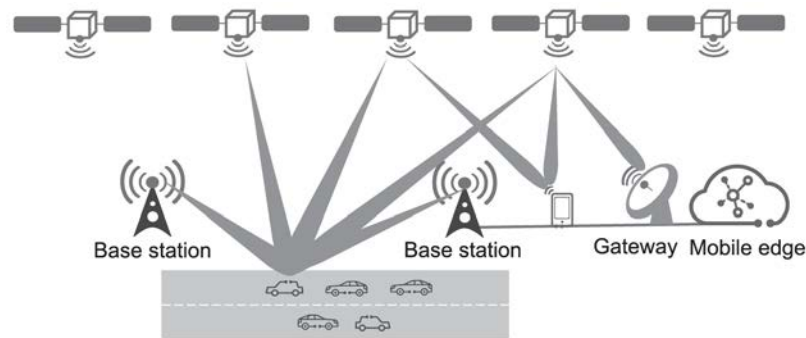


Рисунок 1.2 – Інтегрована телекомунікаційна система муніципального призначення

Крім використання фіксованої та рухомої ретрансляції, привабливою перспективою виглядає пряме з'єднання між наземними станціями та мобільними телефонами. Протягом багатьох років таке з'єднання було надзвичайно дорогим та забезпечувало низьку швидкість передачі даних. Крім того, абонентам доводилося мати два різні телефони: один для доступу до супутникової мережі, а інший – для доступу до мережі. У майбутньому 6G дозволить інтегрувати всі типи доступу до одного мобільного телефону, забезпечуючи плавне перемикання між послугами.

Для забезпечення стабільного та високоякісного обслуговування в сільській місцевості інтегрована мережа 6G повинна забезпечувати високу швидкість передачі даних, аналогічну тій, що пропонується через сільські базові станції 5G, зокрема 50 Мбіт/с у низхідному каналі (завантаження) та 25 Мбіт/с у висхідному каналі (вивантаження) у перерахунку на одного користувача [2].

Надання користувачам доступу до інтернет-послуг у будь-який час через один і той же пристрій незалежно від їхнього місцезнаходження, чи то вдома, чи в літаку, є однією з кінцевих цілей створення бездротових мереж. Сьогодні транспортні засоби можна розділити на чотири основні типи: автомобілі, поїзди,

літаки та кораблі (рис. 1.3). Якщо взяти за приклад літак, то в 2019 році цим типом транспорту скористалися понад 4 млрд осіб [3]. Більшість із них не мали доступу до інтернету під час польотів; для тих, у кого він був, поєднання було повільним і дорогим. У майбутньому інтегровані системи 6G мають забезпечувати мобільне широкопasmове підключення всім пасажиром літаків. Швидкість передачі даних для кожного користувача повинна перевищувати 15 Мбіт/с та 7,5 Мбіт/с для завантаження та вивантаження відповідно [2], за умови 20%-го коефіцієнта активності та 400 користувачів на літак. У цьому випадку загальна швидкість передачі даних для одного літака повинна бути не менше 1,2 Гбіт/с і 600 Мбіт/с для завантаження та вивантаження відповідно.

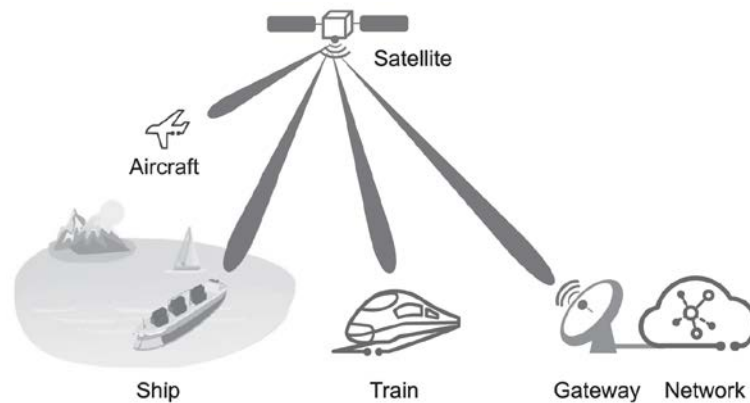


Рисунок 1.3 – Схема широкопasmової інфокомунікаційної мережі доступу

Надійна та безперебійна система екстреного зв'язку має вирішальне значення у сценаріях реагування на стихійні лиха, оскільки вона забезпечує їх прогнозування, оповіщення, реагування на надзвичайні ситуації та екстрений зв'язок. У деяких випадках стихійне лихо може порушити роботу наземних мереж; однак технологія 6G об'єднує наземні та неназемні мережі для забезпечення безперервного обслуговування та підтримки керування у надзвичайних ситуаціях. Система зв'язку для керування в надзвичайних ситуаціях включає кілька систем, таких як провідна і бездротова передача голосу, мережа передачі даних і відеосистеми. За допомогою програмного

забезпечення для керування та диспетчеризації у надзвичайних ситуаціях можна швидко зв'язатися з командним центром, відповідними підрозділами, групами експертів та місцевими рятувальними командами.

1.2 Особливості застосування технології інтернет речей

В даний час зв'язок для інтернету речей заснований на покритті земної поверхні наземною мережею. Однак у багатьох випадках цей підхід не може гарантувати безперебійне підключення. Наприклад, збирання інформації з буїв в океані або передача інформації з контейнерів під час їх транспортування морем можуть перериватися. У майбутньому пристрої інтернету речей повинні мати можливість підключатися до 6G та передавати інформацію у будь-якому місці та у будь-який час. Широкий спектр послуг інтернету речей охопить непідключені місця, такі як віддалені райони, океани тощо.

У віддалених районах з обмеженим стільниковим зв'язком може бракувати ресурсів для масового підключення пристроїв інтернету речей. У багатьох ненаселених районах, таких як Антарктида та пустелі, люди розміщують пристрої доступу до інтернету для збору інформації. Однак, ці області не покриваються наземними мережами, а це означає, що можливості збору інформації обмежені. Технологія 6G, інтегруючи наземні та неназемні мережі, забезпечить доступ для пристроїв IoT у ненаселених районах, що спростить збір такої інформації, як переміщення пінгвінів або білих ведмедів, та моніторинг посівів на віддалених фермах.

У деяких випадках користувачам необхідно розмістити в океані буї для вимірювання висоти хвиль, температури води та швидкості вітру. Така інформація може допомогти морякам уникнути ділянок з сильним вітром і хвилями або вжити необхідних запобіжних заходів. Крім того, важливо повідомляти інформацію про стан контейнерів під час морських перевезень на великі відстані. Якщо користувачам буде доступна інформація про кожен контейнер у режимі реального часу, вони зможуть перевіряти температуру,

вологість та місцезнаходження контейнерів протягом усього процесу транспортування.

1.3 Високоточне позиціонування та навігація в інфокомунікаційних мережах

Сучасні супутникові навігаційні системи, що широко застосовуються в побуті, забезпечують позиціонування з точністю близько 10 м. Глобальна навігаційна супутникова система (GNSS) і система інтегрованого позиціонування на основі низькоорбітального сузір'я (LEO) можуть забезпечувати високоточне позиціонування та навігацію, досягаючи точності близько 10 см на відкритому просторі. Завдяки інтеграції наземних та неназемних мереж високоточне позиціонування та навігація можуть бути реалізовані по всьому світу, незалежно від того, чи використовуються вони у центрі міста чи у віддалених районах. Це спростить надання багатьох нових послуг, таких як високоточні служби позиціонування користувачів та служби навігації для безпілотних автомобілів, точні сільськогосподарські та будівельні роботи.

Високоточна навігація може помітно підвищити ефективність сільськогосподарських робіт, наприклад, за рахунок підвищення точності позиціонування машин у полі. Удосконалені технології позиціонування та навігації забезпечать надійну технічну підтримку для таких операцій, як точна підготовка землі, посів, культивування, внесення добрив, захист рослин, збирання врожаю, обприскування та багато іншого.

У майбутньому більшість автомобілів зможуть підключатися до мережі 6G. Наземна мережа може надавати високоякісні послуги V2X для транспортних засобів у місті, у той час як неназемна мережа може надавати послуги точного (у межах кількох десятків сантиметрів) позиціонування та навігації для транспортних засобів у віддалених та ненаселених районах за допомогою

мегагруповань LEO, як показано на рис. 1.2. Крім того, для підвищення точності навігаційних послуг мережі 6G широко використовуватимуться БПЛА.

1.4 Моніторинг земної поверхні в реальному часі

Одним із типових варіантів використання сучасної супутникової системи є дистанційне сканування та спостереження поверхні Землі за допомогою методів багатоканальної зйомки. Такі методи включають оптичну зйомку, при якій зображення отримують за допомогою камер видимого світла і частково інфрачервоного діапазону, і радіочастотного сканування, при якому зображення формують шляхом запису та аналізу радіохвиль, відбитих від земної поверхні, за допомогою радара із синтезованою апертурою. Однак через обмежені можливості каналів зв'язку мине час, перш ніж користувачі зможуть масово використовувати ці зображення. У майбутньому інтегрована мережа 6G дозволить одночасно здійснювати моніторинг Землі та зв'язок у рамках єдиної системи.

1.5 Повнофункціональна індустрія 4.0

Індустрія 4.0 належить до четвертої промислової революції, яка автоматизує традиційну промисловість із застосуванням сучасних інтелектуальних технологій [1]. У порівнянні з промисловістю 3.0, як показано на рис. 1.4, індустрія 4.0 націлена на промислове виробництво зі значно збільшеною гнучкістю, універсальністю, зручністю використання та ефективністю на основі передових кіберфізичних систем. Виходячи з цього ми можемо запропонувати бачення розширеної індустрії 4.0+, інтелектуального виробництва, яке стане результатом швидкого розвитку технологій бездротового зв'язку та автоматизації, а також штучного інтелекту та машинного навчання в реальному часі.

Як показано на рис. 1.4 кожному поколінню обробної промисловості потрібні десятиліття для розвитку та вдосконалення. Це дуже відрізняється від індустрії бездротового зв'язку, де кожне покоління має коротший життєвий цикл. Для індустрії 4.0 ключове значення мають нові технології, такі як бездротовий зв'язок та інтернет речей на основі новітніх досягнень інформаційно-комунікаційних технологій.

Незважаючи на те, що на сьогоднішніх підприємствах використовуються бездротові технології, такі як Wi-Fi, LTE, Bluetooth та Zigbee, вони не стали основними методами організації зв'язку для використання в автоматизації виробництва. Здебільшого це пов'язано з обмеженнями технологічних характеристик. Проте мережа 5G має великий потенціал через те, що в ній приділяється велика увага зв'язку міжмашинного типу, наднизькій затримці та високонадійному зв'язку.

Області застосування бездротової технології можна розділити на п'ять категорій: автоматизація виробництва, автоматизація процесів, людино-машинний інтерфейс та виробничі IT, логістика та складування, а також моніторинг та профілактичне обслуговування [2]. Типові варіанти використання, які потрапляють до цих категорій: керування рухом, мобільна панель дистанційного керування, мобільний робот, широка бездротова сенсорна мережа, віддалений доступ та обслуговування, доповнена реальність, керування процесами із зворотним зв'язком, моніторинг процесів та керування складськими запасами [2]. Один варіант використання може належати до однієї або кількох областей застосування.

Незважаючи на те, що деякі з перерахованих варіантів використання можуть бути реалізовані в 5G, у найбільш складних випадках ми змушені очікувати появи систем зв'язку наступного покоління. Наприклад, деякі варіанти можуть мати екстремальні вимоги або бути розміщені в умовах надвисокої продуктивності мережі, складних умовах поширення радіосигналу з потенційно високими перешкодами, застарілих установок, які можуть вимагати безшовної інтеграції в нове виробництво, особливих міркувань безпеки та захисту даних. З

іншого боку, нові функції мереж 6G можуть простимулювати активні інновації в області індустрії 4.0, і не тільки.

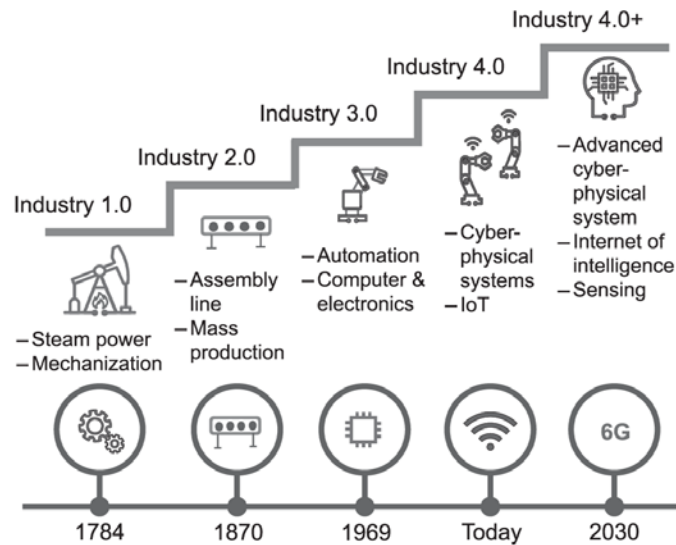


Рисунок 1.4 – Дорожня карта промислової революції

Концепція складальної лінії, як і раніше, використовується на виробничих підприємствах майже через 100 років після винаходу Генрі Фордом через властиву їй високу ефективність. Однак така ефективність найкраще підходить для масового виробництва, що ставить під загрозу гнучкість виробництва та можливість налаштування. У результаті звичайна складальна лінія не може відповідати вимогам індивідуалізації майбутнього виробництва [3].

В результаті, фабрика майбутнього прагне повної революції, щоб зрештою реалізувати виробництво «без освітлення» з повною автоматизацією та гнучкістю. Іншими словами, це виробництво без людей на робочому місці, що означає, що цехи не потребують освітлення. Фабрика майбутнього не лише по-іншому виглядає та працює, а й по-іншому впроваджує інновації.

- Бездротовий зв'язок як перший крок до гнучкості: головний крок, необхідний для створення гнучкого замовного виробництва, полягає у звільненні машин від кабелів. Іншими словами, це будуть індивідуальні та гнучкі виробничі модулі, які миттєво переміщуються для формування складальної лінії та взаємодіють з іншими роботами, AGV, а також дронами за допомогою обміну

інформацією по надвисокопродуктивних радіоканалах. Таким чином, концепція складальної лінії може дійсно трансформуватися із звичайного «масового виробництва» в орієнтоване на майбутнє «виробництво на індивідуальне замовлення».

- Швидке поширення інтелекту серед роботів: індивідуальна інформація про всі об'єкти на заводі збиратиметься і виражатиметься у вигляді фізичних уявлень у цифровому віртуальному світі, які будуть використовуватись для проектування, моделювання та оптимізації виробничого процесу. Більше того, ШІ набуде широкого поширення в обробній промисловості. Наприклад, машини та роботи зможуть накопичувати виробничий досвід та знання, які потім можуть бути передані іншим машинам та роботам на тій самій виробничій лінії, на інших виробничих лініях або на різних заводах по всьому світу за допомогою передових технологій мобільного зв'язку. Таким чином, одна машина або робот може використовувати інтелект всіх інших машин або роботів, що, у свою чергу, призводить до оптимізованого виробничого процесу, що швидко розвивається. Крім того, у цих сценаріях для спільної роботи над завданням потрібно кілька роботів, і тому їх комутації не ґрунтуватимуться на простому підключенні. Це формує типовий сценарій «підключеного інтелекту».

- Виявлення в реальному часі для профілактичного обслуговування: все виробниче середовище буде контролюватись за допомогою безлічі датчиків з надщільним підключенням та інтелектуальної радіочастотної зондувальної системи. Все це націлене на забезпечення профілактичного обслуговування всього виробничого середовища та технологічного процесу, гарантії, і ефективність виробництва. Навіть незначний виробничий брак може бути виявлений у режимі реального часу та миттєво виправлений.

- Низький вуглецевий слід та екологічно чистий завод: оскільки в більшості цехів заводу немає людей, немає необхідності тримати світло увімкненим або обслуговувати інші приміщення для співробітників. Наприклад, весь моніторинг може виконуватися через бездротові сенсорні мережі або RF-зондування функції, інтегровані в систему зв'язку 6G; отже, немає необхідності тримати

увімкненим світло і для камер спостереження. У цьому випадку можна досягти набагато менших операційних витрат та викидів вуглекислого газу.

Завод майбутнього пропонує широкий спектр сценаріїв використання і вимагатиме задіяти як ОТ-, так і ІСТ-технології. У наступних розділах ми розглянемо низку складних випадків використання.

Система керування рухом – це життєво важливий компонент процесу автоматизації. Вона широко використовується в багатьох галузях промисловості, включаючи виробництво, автомобілебудування та медицину. Вона відповідає за керування, переміщення та/або обертання деталей машини чітко певним чином (наприклад, у друкарських машинах, верстатах чи пакувальних машинах). У процесі керування із зворотним зв'язком контролер руху відправляє команди одному або декільком виконавчим механізмам строго циклічно та детерміновано. Після отримання заданих значень від контролера виконавчі механізми виконують відповідні дії над одним чи кількома об'єктами. Наприклад, вони можуть обертати руку робота або переміщати певний компонент машиною. У той же час датчики визначають поточний стан процесів (наприклад, поточне положення та/або кут повороту одного або декількох компонентів) і відправляють фактичні значення назад до контролера руху [2].

Керування рухом – один із найскладніших варіантів використання в галузі автоматизації; він вимагає надвисокої надійності та детермінованого зв'язку з малою затримкою. Наприклад, затримка каналу E2E (включаючи радіоінтерфейс, ядро та транспортні мережі), допустима для додатків керування рухом, таких як верстати або пакувальні машини, може бути навіть на рівні мікросекунд при рівні надійності вище 99,9999%. Цей тип механізмів використовується у сучасному виробництві протягом десятиліть. Сьогодні у системах керування рухом широко використовуються провідні технології, такі як промисловий Ethernet [2, 4].

Щоб змістити парадигму від фіксованої до гнучкої виробничої лінії, яка може бути зібрана як будівельні кубики Lego, першим і основним кроком є заміна провідного зв'язку бездротовими каналами. Проте, коли йдеться про ту ж

пропускну здатність, що й у промислового Ethernet, це простіше сказати, ніж зробити. Незважаючи на те, що варіанти використання 5G для керування рухом вже обговорюються, більшість з них можуть бути реалізовані тільки в 6G через обмеження пропускну здатності. Таким чином, наднизька затримка і надвисока надійність зв'язку з детермінованими функціями стануть безумовно проблемою при проектуванні всієї системи мобільного зв'язку.

Завдяки розвитку робототехніки промислові роботи знайшли свій шлях до індустріального світу. Вони можуть виконувати зварювання, фарбування та паяння, а також безліч інших завдань. Таким чином, вони продовжуватимуть відігравати життєво важливу роль у промисловості майбутнього. Одним із варіантів використання є спільне транспортування [2], коли великі або важкі деталі доставляються у потрібне місце декількома роботами. Безпечна та ефективна співпраця роботів досягається за допомогою програми кіберфізичного контролю, яка координує їх рухи. Зв'язок між роботами потребує надвисокої надійності та доступності послуг, а також суворої синхронізації. Також варто відзначити, що команди керування передаються, а дані з датчиків приймаються за допомогою детермінованого періодичного зв'язку.

Колективна робоча сила може використовуватися як для перенесення жорстких або тендітних деталей, які вимагають дуже точної координації між роботами, так і більш гнучких або еластичних деталей, які забезпечують певну свободу у скоординованих рухах. В обох випадках мережі, які працюють краще з точки зору синхронізації, затримки та точності локалізації, можуть допомогти підвищити ефективність спільної роботи. Як правило, затримка E2E, необхідна для колективного функціонування роботів, може становити приблизно 1 мс, а надійність перевищує 99,9999 %.

На фабриці майбутнього роботи працюватимуть у повній гармонії один з одним та машинами. Ця співпраця є більшою, ніж просто заздалегідь визначені програми. Іншими словами, вона заснована на роботах, що сприймають навколишнє середовище, та інтелектуальній обробці отриманої інформації та знань на основі ІІІ.

У промисловості з'явилося складове слово кобот (cobot) – поєднання слів collaboration (співпраця) та robot. Це концепція, що використовується для просунутої промисловості 4.0, і не тільки. На відміну від згаданого вище варіанта використання, коли роботи працюють один з одним, кобот відноситься до робіт, які можуть тісно та інтерактивно взаємодіяти з людьми як партнери. Різниця зі звичайними роботами в тому, що коботи не відокремлені від людей традиційними захисними засобами, такими як екрани з плексигласу або огорожі. Коботи виконують роботу, яка для людей є надто складною чи небезпечною.

Інтелект, точність, стійкість та надійність є ключами до забезпечення ефективної взаємодії людини з машиною у повсякденному житті або при виконанні фізично складних робіт у небезпечному середовищі. На відміну від звичайних промислових роботів, коботи не обмежуються фіксованими завданнями чи областями. Їх можна навчати за допомогою спостережень за діями та логічними висновками наставників-людей чи електронних колег. Для цього базова інфраструктура, необхідна для підтримки мобільності та можливості підключення коботів, повинна мати пропускну спроможність промислового рівня.

Оснащені складною системою сенсорів та швидкодіючими засобами зв'язку, коботи можуть реагувати на людей та взаємодіяти з ними. Ця технологія відкриває широкі перспективи у промисловості, особливо з урахуванням того факту, що поточна глобальна тенденція полягає у старінні населення. Літні співробітники можуть працювати довше, якщо коботи підтримуватимуть їх у фізично складних справах. Тим часом, коботи можуть легко розширити свою професійну сферу застосування від вертикальних галузей промисловості до орієнтованих на клієнта послуг у роздрібній торгівлі або громадському харчуванні. Ці коботи можуть розширити наші можливості як у професійній сфері, так і у сфері дозвілля за допомогою механічних та інтелектуальних методів.

Якщо ми розглядаємо коботів як втілення інтелектуальної кібернетики, що представляє злиття штучного інтелекту, ІСТ та ОТ на найвищому рівні, то

наступним кроком будуть кіборги. Концепція кіборга була сформульована в 1960 році і спочатку визначалася наступним чином: «кіборг навмисно включає в свій склад екзогенні компоненти, що розширюють функцію саморегулювання організму, щоб пристосувати його до нових умов»[5]. Іншими словами, кіборги – це кібернетичні організми, або, інакше кажучи, це людські тіла, підсилені машинами. Завдяки останнім передовим розробкам у галузі медицини, механіки та взаємодії людини з машиною, таким як нейроінтерфейси, у найближчому майбутньому кіборги перейдуть із наукової фантастики в реальність. Це принесе неймовірну користь, особливо людям із обмеженими фізичними можливостями. Наприклад, ці люди зможуть бачити та переміщати предмети і, як такі, будуть на рівних з усіма у робочому середовищі. Навіть люди без фізичних проблем зможуть захистити себе у небезпечному професійному середовищі, підвищивши при цьому свої знання та поінформованість про навколишнє середовище. Підсумовуючи, можна сказати, що нейробиологія та робототехніка розвиватимуться у тандемі з технологіями мобільного зв'язку, самі люди можуть служити новими мобільними пристроями, а мережа 6G стане ключем до взаємодії.

1.6 Розумне місто та розумне життя

Поняття «розумне місто» та «розумне життя» охоплюють дуже широке коло варіантів використання мереж 6G, які перетворюють усі аспекти міського життя. Зі стратегічної точки зору, ці варіанти спрямовані на забезпечення ефективного муніципального керування, високоякісних державних послуг та сталого економічного розвитку. Ця трансформація почалася в епоху 4G з підтримки IoT у мобільному зв'язку та еволюціонувала до 5G як mMTC. Наступний етап передбачає перехід до технології 6G, що передбачає більш суворі вимоги до систем мобільного зв'язку.

Використання мобільного зв'язку для підключення транспортних засобів (vehicle-to-everything, V2X) розпочалося з 4G LTE та змінило всю транспортну

екосистему. Підключення не тільки підвищує комфортність водіння, але також забезпечує більшу безпеку та більш високу ефективність використання транспортних ресурсів. Стільниковий зв'язок V2X має дуже широку сферу застосування, що включає: безпеку, оптимізацію експлуатації транспортних засобів, безпілотне керування, підвищення ефективності дорожнього руху, екологічність, а також взаємодію з суспільством і співтовариствами [1]. Серед них найскладнішим є безпілотне керування, яке й принесе нам найбільше інновацій.

Суспільство автомобільних інженерів (society of automotive engineers, SAE) встановило кілька рівнів автоматизації транспортних засобів, де рівень 0 відповідає транспортним засобам із повністю ручним керуванням, а рівень 5 відповідає повністю автоматизованим транспортним засобам [2]. Сканування, підключеність та зв'язок є фундаментальними факторами, що сприяють розвитку безпілотних транспортних засобів.

Першим по-справжньому ринковим варіантом безпілотного керування може стати телекерування. Для прикладу застосування телекерування можна назвати такі галузі, як промисловий видобуток корисних копалин, кар'єрні розробки, будівництво та сільське господарство. Завдяки високому рівню автоматизації всіма важкими машинами (наприклад, кранами та буровими установками) у небезпечних зонах можна буде керувати віддалено, що призведе до появи нових професій. Наявність у повсякденному житті споживачів безпілотних транспортних засобів або дронів 5-го рівня змінить наше розуміння автомобільних подорожей. Безпілотне водіння 5-го рівня без пробок у годину пік та необхідності заздалегідь планувати маршрут вплине на наше життя так само, як перехід від кінської тяги до парового двигуна. Для безпілотного водіння 5-го рівня найскладнішими чинниками є непередбачувані природні явища по дорозі. У світлі цього послуги сканування та штучного інтелекту, що надаються системами мобільного зв'язку, допоможуть транспортним засобам отримувати точну інформацію для прийняття рішень. Ефективність водіння (наприклад, поєднання таких факторів, як швидкість автомобіля та густина руху) нерозривно

пов'язана з пропускнуою здатністю систем зв'язку. Зрозуміло, що вимоги до рівня обслуговування вимагають надмалої затримки (порядку однієї мілісекунди або нижче) і високої надійності (99,9999 % або вище) зв'язку, а також точної локалізації (наприклад, для визначення відстані між транспортними засобами). Зрозуміло, безпека та надійність також належать до переліку критично важливих параметрів. Наслідки злому зловмисниками системи керування безпілотним транспортом можуть бути настільки жахливими, що їх важко уявити. Потрібно враховувати деякі практичні питання з погляду архітектури. Одна з проблем пов'язана з оновленням платформи граничних (периферійних) обчислень, в якій задіяні кілька операторів та постачальників, щоб усунути вузькі місця швидкодії, особливо для високошвидкісних кінцевих пристроїв. Крім бездротових швидкісних з'єднань, необхідний системний інтелект. Він не тільки включає адаптивні рішення, що ґрунтуються на тривалості ситуацій, але також передбачає небезпечні ситуації та пропонує відповідні дії або рішення.

Транспортні засоби є надзвичайно своєрідним користувальницьким обладнанням – мобільний інтелектуальний об'єкт без помітних енергетичних обмежень – і тому сильно відрізняються від звичайних мобільних пристроїв, таких як смартфони. Вони генерують величезні обсяги даних та збирають дані від найближчих колег; отже, вони можуть діяти як рухливі грані фіксованої інфраструктури, що породжує цікаві, але складні питання щодо проектування системи.

Будівельна галузь є замкнутою екосистемою з різними варіантами використання. Як і інші галузі бізнесу, вона також перебуває у процесі цифрової трансформації. Технологія розумних будівель включає не тільки встановлення в будівлях новітніх електронних продуктів (наприклад, ліфтів і телевізорів), але також і керування будівлями як інтелектуальними об'єктами з безперервним обміном інформацією між електронними пристроями, інтелектуальними матеріалами та системами керування та безпеки будівель. Технологія розумних будівель передбачає ще гнучке створення багатоцільових будівель із значно підвищеною енергоефективністю та інтелектом.

Перша тенденція – це інтеграція та автоматизація систем будівлі, коли одна будівля може містити до 10 різних підсистем, пов'язаних з використанням гетерогенних каналів. Ці підсистеми можуть включати, наприклад, систему камер спостереження, систему керування ліфтами, систему пожежної сигналізації, систему керування паркуванням, систему кондиціонування повітря, систему електропостачання та опалення, а також систему керування автоматизацією будівлі. Утримання та експлуатація таких будівель можуть бути дуже витратними, але при цьому неефективними. Ключем до впровадження технології мобільного зв'язку в індустрію розумного домобудування є використання її як загальної інфраструктури для об'єднання різних підсистем, що має сувору ізоляцію ресурсів та високу власну надійність. Індустрія розумного домобудування також широко застосовуватиме ІСТ – від мобільного зв'язку до інтернету речей. Наприклад, у сучасній комерційній будівлі кількість датчиків (для моніторингу навколишнього середовища, моніторингу інфраструктури, керування персоналом тощо) може досягати рівня 10^5 і вище. Отже, дуже важливо, щоб індустрії розумного домобудівництва надавалася доступна послуга масового підключення. Крім того, деякі датчики, які використовуються для моніторингу навколишнього середовища (наприклад, детекторам диму), зазвичай пред'являються дуже високі вимоги з точки зору енергоспоживання. Батарея зазвичай має прослужити щонайменше два роки, а ідеалі – понад 20 років. Крім того, будівлі також будуть оснащені розумними матеріалами та об'єктами, такими як роботи та коботи, які потребують спілкування та є інтерактивними.

Друга тенденція – взаємодія між будинками у різних регіонах. У майбутньому будинки більше не будуть ізольовані; натомість вони будуть пов'язані між собою всередині одного регіону чи різних регіонах. Тому очікується, що інфраструктура мобільного зв'язку забезпечить цифрову основу для надійної взаємодії між платформами, об'єктами та регіонами.

Всеосяжне та індивідуалізоване надання медичних послуг без будь-яких географічних обмежень – це перспектива розвитку електронної охорони здоров'я

на наступне десятиліття. Реалізація цього бачення багато в чому залежить від розвитку систем мобільного зв'язку, до яких будуть пред'являти більш жорсткі вимоги щодо надійності, доступності, безпеки та конфіденційності.

У поєднанні із штучним інтелектом аналіз даних, отриманих від пацієнтів у режимі реального часу, може допомогти у прогнозуванні серйозних захворювань. У цьому плані передова інфраструктура з можливостями зондування матиме велике значення для допомоги у боротьбі з великими пандеміями, такими як COVID-19. Спираючись на передові відео-, голографічні та тактильні технології, вони виведуть професійну взаємодію та досвід роботи з ефектом присутності на новий рівень. Можна сміливо припустити, що дистанційна діагностика, дистанційна хірургія та динамічний моніторинг, а також голографічне медичне навчання стануть переважаючими технологіями у майбутньому, як показано на рис. 1.5. Такі сценарії використання, як дистанційна хірургія, можуть вимагати надмалої затримки та надвисокої надійності зв'язку на міжконтинентальній відстані (наприклад, для лікаря в Китаї, який виконує операцію на серці пацієнта в Африці). Це буде важливим для зниження гостроти проблеми старіння суспільства, особливо в регіонах з обмеженими медичними ресурсами.

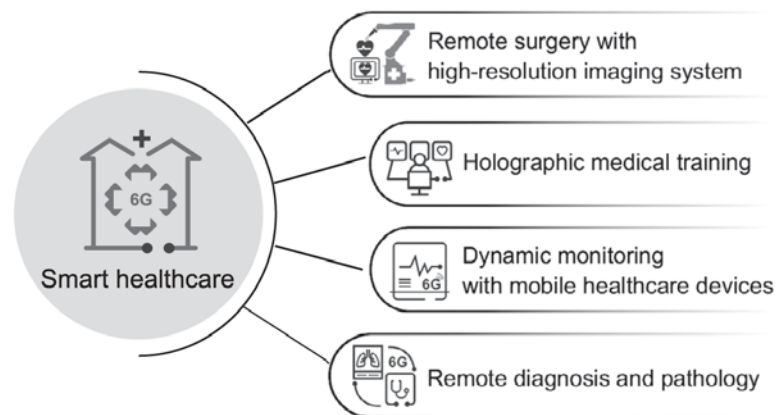


Рисунок 1.5 – Структура розумної системи охорони здоров'я

БПЛА або дрони є літальний апарат без пілота-людини на борту. Ними можна керувати дистанційно за допомогою пульта керування, і вони мають

низку частково автономних польотних функцій, які в майбутньому стануть повністю автономними. БПЛА бувають різних розмірів і вантажопідйомності і можуть використовуватися в різноманітних сферах бізнесу. Наприклад, як показано на рис. 1.6, у них можуть бути комерційні та промислові застосування, такі як автоматична безпілотна інспекція, екстрене реагування для розумного та безпечного міста, моніторинг навколишнього середовища та інтелектуальна логістика, як сказано у прикладі 1.6.

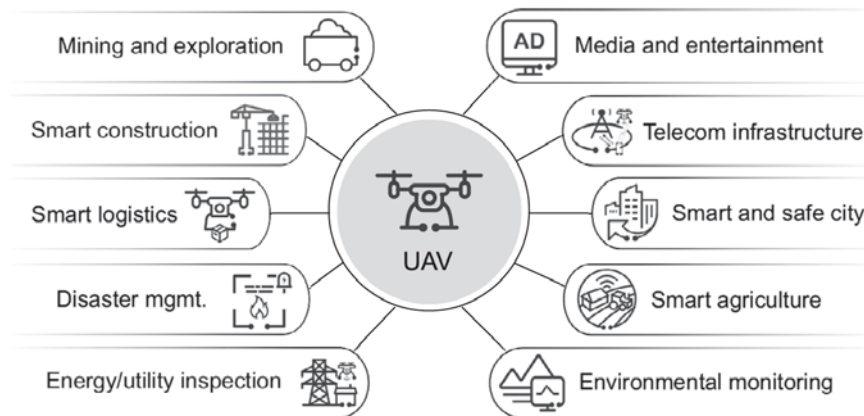


Рисунок 1.6 – Схема взаємодії БПЛА із спеціалізованими системами доступу

Дрони також можуть бути використані для розширення меж вищезазначених галузей за рахунок нових варіантів використання. За даними Keystone, ринок технологій БПЛА досягне 41-114 млрд. доларів США в усьому світі протягом наступних п'яти років [3].

Незалежно від галузі промисловості, основною властивістю безпілотних літальних апаратів є повітряна мобільність. Вони є зручною платформою для переміщення різних датчиків і камер високої роздільної здатності. З цієї причини безпілотні літальні апарати відіграватимуть важливу роль у підвищенні сенсорних можливостей 6G. БПЛА не обов'язково повинні обмежуватися роллю кінцевого пристрою; вони можуть застосовуватися як ретранслятор або точка доступу для формування тимчасової мережі та розширення зони дії мобільного зв'язку, особливо у виняткових сценаріях (наприклад, при аваріях у горах або стихійних лих). Іншими словами, гнучкість та маневреність БПЛА можуть

зробити їх гарною альтернативою у критичних ситуаціях за відсутності фіксованої інфраструктури.

БПЛА є дійсним варіантом використання 5G, і вони будуть розвиватися в напрямку 6G з точки зору більш високих вимог КРІ, включаючи надвисоку швидкість передачі даних (наприклад, відеопотік з оглядом 360 ° з пропускну здатністю більше 10 Гбіт/с), надвисоку надійність та наднизьку затримку (для плавного керування або повністю автономного польоту). БПЛА потребують високоточного позиціонування, і показовий приклад полягає в тому, що для прямої відеотрансляції 8К, лазерного картографування/патрулювання та серійних фотознімків може знадобитися визначення місця розташування з точністю до одного сантиметра. Крім вимог КРІ для БПЛА буде обов'язковою надійність промислового рівня. Вона користується попитом у сценаріях, де, наприклад, БПЛА стають джерелом приватних даних. У цьому контексті розробки нових систем мобільного зв'язку також враховуватимуть можливість забезпечення суверенітету даних.

Однак, обмежена ємність акумулятора не дозволяє безпілотним літальним апаратам працювати протягом тривалих періодів часу. Отже, «зелений зв'язок» безперечно стане в нагоді для організації енергозберігаючого зв'язку з БПЛА.

1.7 Висновки до розділу 1

Розглянуто сучасні технології, що дозволяють більш ефективно та глобально застосовувати мережі мобільного доступу. Зокрема досліджено варіанти підключення до мережі 6G через наземні та неназемні канали, використовуючи той самий мобільний телефон або портативний пристрій у будь-якому місці та в будь-який час. Крім того, здійснено оцінювання стійкості інтегрованої мережі 6G до стихійного лиха, та визначено потенційну можливість забезпечення підключення для служб швидкого реагування та надання допомоги при лихах.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ

2.1 Фундаментальна теорія штучного інтелекту

Технологія ШІ розвивається швидкими темпами, особливо з того часу, як нейронні мережі отримали для використання високопродуктивні графічні процесори. У першій частині цього розділу ми розглянемо базові визначення в галузі машинного навчання, а потім детальніше опишемо основи теорії штучного інтелекту.

Штучна нейронна мережа (ANN) складається із зв'язаних між собою елементарних процесорів, які називають нейронами, що зазвичай організовані в кілька послідовних шарів. Вхідний шар отримує вихідні дані, які потім обробляються одним або декількома прихованими шарами і, нарешті, вихідним шаром, який надає вихідні дані ANN для подальшого використання. Якщо ANN містить лише один прихований шар, вона називається дрібною, а якщо є більше одного прихованого шару, вона називається глибокою. Зазвичай практично використовують глибокі ANN, оскільки встановлено, що вони вимагають менше нейронів, ніж дрібні мережі за рівної функціональності [1]. У глибокому навчанні кожен нейрон виконує три операції:

- обчислює афінну комбінацію вхідних даних;
- обчислює функцію активації (зазвичай нелінійну), вхід якої є результатом раніше обчисленої афінної комбінації (наприклад, спрямованих функцій, сигмоїдальних функцій та гіперболічних тангенсів);
- передає результат нейронам наступного шару.

Хоча операції, що виконуються кожним нейроном, досить прості, поєднуючи достатню кількість нейронів, можна вирішувати складні завдання. Було показано, що ANN є універсальними апроксиматорами функцій, завдяки чому їх відносини введення-виведення можуть відтворювати будь-які функції, за умови, що ваги та зміщення афінних комбінацій правильно налаштовані [2]. На

жаль, ця можливість марна, якщо ми не знаємо, як налаштувати ваги і зміщення для виконання цього завдання. Процедура пошуку ваг і значень називається навчанням ANN і являє собою подачу набору даних з відомими парами введення-виведення в ANN, а потім використання алгоритмів навчання, що добре зарекомендували себе, і стохастичного градієнтного спуску (SGD, stochastic gradient descent) [3, 4] для екстраполяції конфігурації ваги та зсувів.

Глибокі нейронні мережі (DNN) утворюють підмножину ANN. Глибока нейромережа складається з кількох шарів, кожен із яких містить кілька нейронів. Нейрони одного шару пов'язані з нейронами наступного шару, і кожен зв'язок має вагу. Кожен нейрон поєднує всі свої входи в один вихід. Ця функція, що об'єднує, є нелінійною і найчастіше схожа на сигмовидну або спрямовану лінійну функцію. Сьогоднішні DNN мають кілька помітних обмежень, які слід ретельно враховувати:

- узагальнення: на практиці канали мобільного зв'язку змінюються з часом. Якщо DNN включає в себе канал із загасанням, що змінюється в часі, це вплине на можливість узагальнення DNN;

- складність: мінімальна кількість нейронів, що використовуються для кодувальника та декодера, визначає їхню складність;

- розмір навчальних даних: точність DNN залежить від набору даних. Способи формування та зменшення розміру навчального набору даних нині є предметом інтенсивних досліджень;

- тривалість навчання: процес навчання DNN, як правило, є тривалим та мінливим. Це залежить від навчальних даних, що є проблемою для його застосування в системах реального часу.

Серед усіх типів DNN найпопулярнішою є згорткова нейронна мережа (CNN); в ній реалізовані двовимірна згорткова фільтрація та максимальне об'єднання на додаток до повної зв'язності між шарами. За допомогою згорткових шарів і шарів з максимальним об'єднанням вхідні дані високої розмірності можуть бути зведені до меншої розмірності, що дозволяє уникнути можливих проблем оптимізації, викликаних розмірністю. Низькорозмірне

уявлення називається прихованим шаром у термінах DNN і містить найважливіші ознаки, текстури чи семантику відповідних багатовимірних вхідних даних, залежно від конкретного предмета навчання.

Завдяки такій багаторівневій архітектурі оптимізація Лагранжа для стохастичного градієнтного спуску може бути реалізована за допомогою ланцюжка функцій, що диференціюються. Використовуючи правило ланцюжка, CNN виконує зворотне поширення за епоху даних, щоб налаштувати всі нейрони на їхні навчальні цілі, застосування чи завдання. Типові цілі (тобто критерії якості) навчання включають середньоквадратичну помилку, максимальну ймовірність та мінімальну помилку класифікації. У деяких випадках для керування процесом навчання (оптимізації) використовується більше однієї мети навчання.

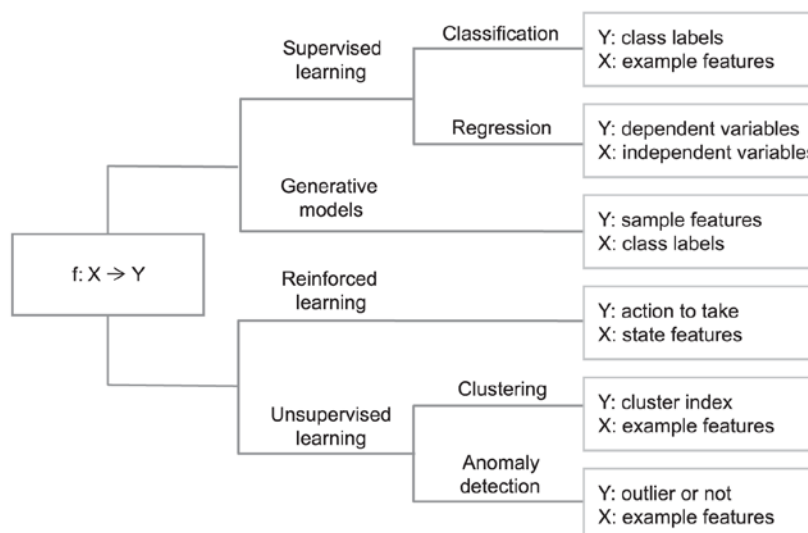


Рисунок 2.1 – Узагальнене подання машинного навчання як карти функцій

У людських (семантичних) мовах речення можна розглядати як ланцюг Маркова, при цьому кожне слово більш менш залежить від попередніх йому слів. Так само радіоканал може бути спрощений до ланцюга Маркова. Проте, хоча традиційні DNN що неспроможні враховувати попередні події, рекурентні нейронні мережі (RNN) використовують вирішення цієї проблеми петлі пам'яті, у яких зберігається певний набір попередніх даних. Концепція RNN має велике

значення для семантичної комунікації. Довготривала короткострокова пам'ять (LSTM) є прикладом рекурентної нейромережі для обробки природної мови (NLP) [5]. Її також запропонували використати у механізмі вибору бездротових каналів [6].

2.2 Таксономія машинного навчання

З математичної точки зору ШІ може в загальних рисах зводитися до питання пошуку невідомого відображення функцій $f: X \rightarrow Y$, де X - це вхідний простір ознак, що представляє точки даних, а Y - простір міток, що представляє вихідні знання. Виходячи з відмінностей у наявному досвіді, цільової функції та конкретних алгоритмах навчання, як показано на рис. 2.1 завдання ШІ можна розділити на три категорії: навчання з вчителем, навчання без вчителя, навчання з підкріпленням. Для удосконалення розробляється самонавчене (частково контрольоване) навчання, що дозволяє знизити витрати на ручну розмітку навчальних даних. Крім того, генеративні моделі призначені для безпосереднього моделювання даних або встановлення умовних розподілів ймовірностей між змінними.

У моделі навчання з учителем (supervised learning, контрольоване навчання) набір навчальних даних попередньо розмічено, тобто містить пари введення-виведення, на яких навчається DNN. Відповідно, при збільшенні навчальних даних, підвищується точність передбачень нейромережі. Навчання з учителем генерує передбачування на основі розмічених даних та передбачає хороше узагальнення невідомих даних. Це найпоширеніший метод навчання моделей, пов'язаних із проблемами класифікації, регресії та ранжирування. Хоча традиційні варіанти, такі як метод опорних векторів та методи ядра, як і раніше, широко використовуються, навчання з учителем є найбільш ефективним варіантом для великих даних, особливо для завдань комп'ютерного зору та NLP. Успіх навчання з учителем обумовлений напрочуд потужною здатністю DNN отримувати ознаки з масиву даних (так зване навчання уявленням). Засіб

отримання структури даних – ключовий компонент контрольованого навчання; наприклад, згортка надзвичайно важлива при роботі із зображеннями. Проте різні структури даних вимагають власних еквівалентів «згортки».

У моделі навчання без вчителя (unsupervised learning, неконтрольоване навчання) набір навчальних даних не розмічений, і DNN має навчитися самостійно отримувати ознаки, шаблони, семантику чи текстури. Отже, модель, навчена без вчителя, робить прогнози для невідомих даних з урахуванням досвіду з нерозміченими даними. За допомогою цього підходу важко точно оцінити здатність моделі, що навчається, до узагальнення. Модель повинна вивчити внутрішні структури та подання нерозмічених даних та зробити прогнози на основі структур та уявлень. Найбільш поширеними завданнями, пов'язаними з навчанням без вчителя, є кластеризація та зменшення розмірності. Автоматичний кодувальник (auto encoder, автоенкодер) – інструмент навчання без вчителя, що широко використовується.

Самоконтрольоване (або частково контрольоване, semi-supervised) навчання – це потенційно потужний метод навчання уявленню, який автоматично генерує якийсь контрольований сигнал для вирішення конкретного завдання (наприклад, для вивчення уявлень даних або автоматичної розмітки набору даних).

Протягом останніх 20 років навчання з підкріпленням (RL) привертає велику увагу та залишається одним із найважливіших напрямків досліджень машинного навчання. Агент у процесі навчання із підкріпленням періодично спостерігає за станом середовища, приймає рішення, отримує результати та коригує свою політику для досягнення оптимальної точності. Одна проблема, яка перешкоджає широкому використанню RL на практиці, полягає в тому, що агенту потрібен значний час, щоб вивчити всі можливі стани, перш ніж перейти до кращої політики.

Швидкий розвиток глибокого навчання [1] в останні роки створило нові можливості у розвитку RL, оскільки використання глибокого навчання, особливо глибоких нейромереж, може значно прискорити навчання та виведення RL. Нова технологія глибокого навчання з підкріпленням (DRL) використовує переваги

алгоритмів глибоких неймереж та спеціального обладнання, такого як графічні та математичні процесори. DRL також забезпечує більш високу швидкість навчання та кращу продуктивність. Більше того, коли група автономних та взаємодіючих об'єктів існує в загальному середовищі, кожен об'єкт може бути оснащений агентом DRL, який допомагає у співпраці, конкуренції та координації з іншими об'єктами за рахунок прийняття правильних рішень для досягнення глобальних цілей.

Більшість проблем прийняття рішень у невизначених та стохастичних середовищах можна змоделювати за допомогою так званого марківського процесу прийняття рішень (MDP) [7], який зазвичай реалізується за допомогою динамічного програмування [8]. Однак із збільшенням масштабу системи обчислювальна складність швидко стає недосяжною для реалізації. Тому, точне моделювання системи іноді є недоцільним. В результаті DRL надає альтернативне вирішення проблеми. На рис. 2.2 схематично представлені основні відмінності між RL та DRL.

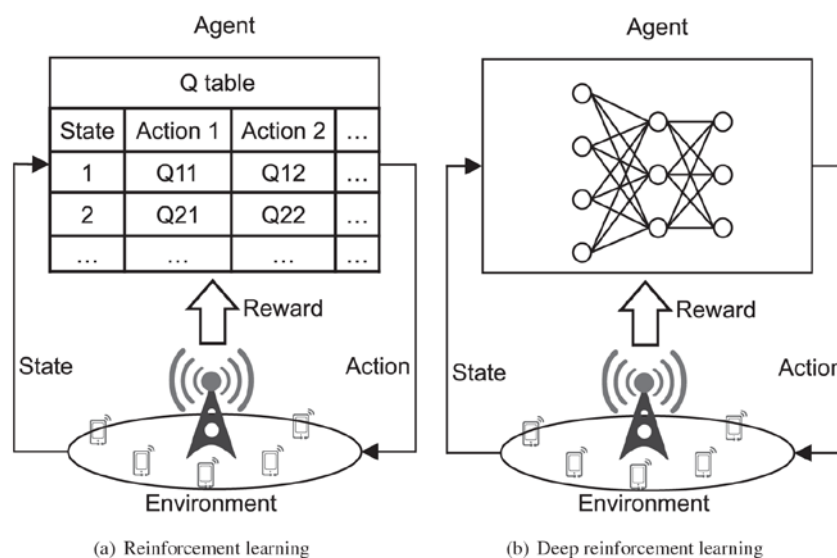


Рисунок 2.2 – Структури RL та DRL у контексті бездротових стільникових мереж

Вищезгадані категорії ШІ або машинного навчання повинні бути реалізовані з використанням конкретної структури нейронної мережі, такої як ANN, DNN або CNN тощо. Далі ми обговоримо спочатку теоретико-інформаційні принципи DNN, потім опишемо кілька класів реалізації DNN.

2.3 Теоретико-інформаційний принцип глибокої нейронної мережі

Для інтерпретації глибокої нейронної мережі (DNN) з акцентом на технології глибокого навчання використовується безліч різних теорій, таких як теорія оптимізації, алгоритми максимізації очікування, теорія топології, теорія графів, семантична теорія, теорія динамічних систем та теорія наближень. Вибір відповідної теорії для інтерпретації DNN залежить від реальної проблеми. Одними з найбільш відповідних теорій у контексті бездротового зв'язку є теорія інформації та теорія інформаційних вузьких місць, зокрема, оскільки вони виходять з тієї ж точки зору на теорію інформації, що й бездротові системи. Далі ми теж дотримуватимемося цієї точки зору.

Одним із показників ефективності комунікацій є теорія інформаційних вузьких місць [9]. Ця теорія знаходиться на стику машинного навчання та прогнозування, статистики та теорії інформації.

Шеннон визначив інформацію, яка є будівельними блоками для теорії глибокого навчання, як невизначеність з імовірнісної точки зору.

По-перше, взаємна інформація $I(X; Y)$ відображає ступінь ймовірнісної взаємодії між двома випадковими величинами: X і Y . Якщо змінюється X , то певною мірою буде змінюватися Y , і навпаки: $I(X; Y) = I(Y; X)$. Глибоку нейромережу можна змоделювати як потік взаємної інформації від входу до виходу.

По-друге, порівняльні відношення взаємної інформації $I(X; Y) = I(P_x; P_{y|x})$ включають увігнуту функцію $I(X; Y)$ від змінного P_x і фіксованого $P_{y|x}$ а також опуклу функцію $I(X; Y)$ змінного $P_{y|x}$ та фіксованого P_x . Звідси випливає

необхідність кодування $I(X; Y)$ джерела інформації, щоб мінімізувати $I(X; Y)$, та кодування каналу, щоб максимізувати $I(X; Y)$.

Шеннон стверджував, що надійна система зв'язку повинна включати і те, й інше. Так само DNN поєднує два змагальних кроки. У той час як у процесі навчання в одні епохи переважає зниження розмірності вектора ознак, а в інші – підвищення, обидва ці фактори необхідні для навчання. Наприкінці навчання досягається рівновага.

Для пояснення того, що відбувається в DNN з точки зору теорії інформації, [9] пропонується теорія інформаційного вузького місця з використанням потоку взаємної інформації та змагального характеру підвищення та зниження розмірності.

Навчаючи DNN, ми очікуємо, що вихідний шар Y буде максимально схожий на вхідний шар X , а прихований шар Z максимально відрізнятиметься від вхідного шару X , наскільки це можливо. З погляду теорії інформації це означає максимізацію $I(X; Y)$ при мінімізації $I(X; Z)$. При русі від X до Z відбувається стиснення (кодування) інформації, а під час руху від Z до Y відбувається декодування.

Припустимо, що у прихованому шарі Z є вузьке інформаційне місце γ : якщо ентропія Z менша, ніж γ , то вся інформація Z може пройти; в іншому випадку може пройти тільки найбільш істотна γ -частина Z .

Взаємна інформація між X і Z визначається наступним чином:

$$I(X; Z) = \sum_x \sum_z P_{z,x} \cdot \log \frac{P_{z,x}}{P_z \cdot P_x} = \sum_x \sum_z P_x \cdot P_{z|x} \cdot \log \frac{P_{z|x}}{P_z}.$$

Перехресна ентропія Y дорівнює:

$$H_{cross}(Z, Y) = -\sum_z P_z \cdot \log P_{y|z} = E_{x \sim P_X} \left[-\sum_z P_{z|x} \cdot \log P_{y|z} \right].$$

З урахуванням інформаційного вузького місця остаточно функція втрат DNN дорівнює:

$$f_{loss} = E_{x \sim P_x} \left[-\sum_z P_{z|x} \cdot \log P_{y|z} \right] + \beta \sum_x \sum_z P_x \cdot P_{z|x} \cdot \max \left(\log \frac{P_{z|x}}{P_z} - \gamma, 0 \right)$$

Оскільки математично складно мінімізувати компонент

$$\sum_x \sum_z P_x \cdot P_{z|x} \cdot \max \left(\log \frac{P_{z|x}}{P_z} - \gamma, 0 \right),$$

альтернативою є мінімізація його верхньої межі $E_{x \sim P_x} [D(P_{z|x} | Q_z)]$, де $D(P_{z|x} | Q_z)$ - дивергенція (розбіжність) Кульбака Лейблера $P_{z|x}$ по Q_z . В результаті функція втрат набуває наступного вигляду:

$$f_{loss} = E_{x \sim P_x} \left[-\sum_z P_{z|x} \cdot \log P_{y|z} \right] + \beta \cdot E_{x \sim P_x} [D(P_{z|x} | Q_z)].$$

Функція втрат визначає інформаційне вузьке місце [10] та виявляє глибинний взаємозв'язок між метою навчання, архітектурою нейронної мережі та розподілом вхідних даних.

Деякі методи навчання можуть використовувати теорію вузьких інформаційних місць для оптимізації своєї архітектури. Наприклад, варіаційний висновок будує нижню межу мети інформаційного вузького місця та навчається на зібраних даних без попереднього знання про їх розподіл [11]. Ця структура може бути розширена на випадки з різними диспропорціями, що виникають у задачах високого рівня, або на випадки з багатозадачними проблемами [12].

З точки зору архітектури нейронної мережі та методу навчання найпростіше розділити модель нейронної мережі, попередньо навчену для завдань високого рівня, на дві частини: одну, що використовується на боці передавача, і одну, що використовується на стороні приймача. Потім можна вставити нейронні шари між двома частинами. Вся модель навчається, потім налаштовується з урахуванням існуючих каналів [13].

2.4 Реалізації глибокої нейронної мережі

При неявній реалізації стиснення ($E_x \sim P_x[D(P_{z|x} | Q_z)]$) у вигляді DNN використовується автоенкодер (auto encoder, AE) [14]. Коефіцієнт стиснення $|Z|/|X|$ відповідає вибірці даних X , а мета Y апіорі невідома. Коли $Y = X$, автоенкодер стає джерелом на основі навчання для блочного коду фіксованої довжини з найнижчим коефіцієнтом стиснення $|Z|/|X|$, який в цілому обмежений знизу $H(X)$. Якщо розмір X недостатньо великий (маленький блок), автоенкодер допоможе знайти вихідний код зі ступенем стиснення $|Z|/|X|$, нижче, ніж $H(X)$.

Варіаційний автоенкодер (VAE) [15] вводить у прихований шар апіорний розподіл (Q_Z), і цей розподіл є показником сприйняття поверх швидкості та стиснення. Типовий варіаційний автоенкодер показаний на рис. 2.3. Різні апіорні розподіли (Q_Z) призведуть до різних коефіцієнтів DNN. Якщо Q_Z є однорідним багатовимірним розподілом Гауса, проекція по кожному виміру є оцінкою цього виміру. Теоретично Q_Z може бути будь-яким іншим розподілом, і, отже, неоднорідні підканали бездротової системи можуть бути змодельовані як Q_Z , що дозволяє налаштовувати VAE для конкретного раніше відомого розподілу.

На відміну від автоенкодерів, які тільки максимізують $I(X; Y)$, варіаційні автоенкодери працюють за двома конкуруючими напрямками, одночасно мінімізуючи $I(X; Y)$ і максимізуючи $I(X; g_Y(Z; \theta_g))$. Наприкінці навчання $I(X; g_Y(Z; \theta_g))$ представляє собою мінімальну взаємну інформацію (Z), яка

присутня у шарі вузького місця. Необхідно враховувати, що варіаційні автоенкодери допомагають генерувати схему кодування загального джерела.

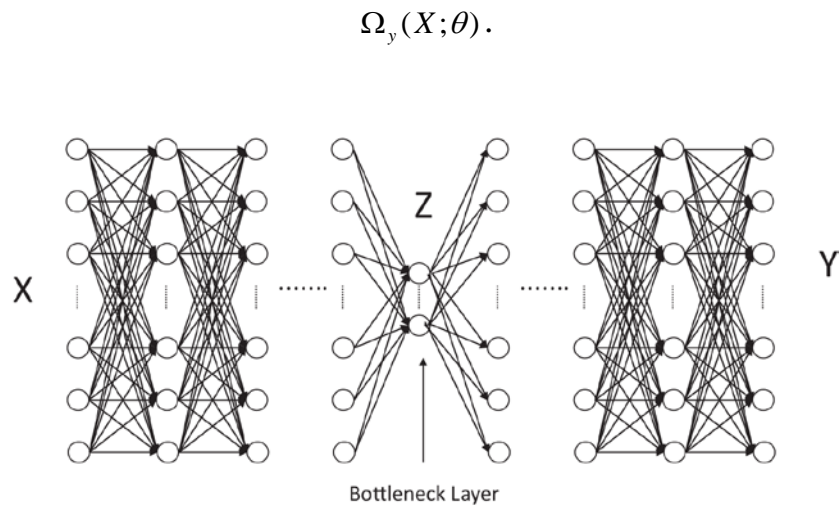


Рисунок 2.3 - Інформаційне вузьке місце автоенкодера при $|X| > |Z|$ та $|Y| > |Z|$, тобто прихований шар Z є вузьким місцем

Генеративно-змагальна мережа (GAN) – це великий крок уперед у порівнянні з VAE [16]. У типовій GAN Васерштейна апріорні розподіли (Q_Z) реальні і не є гаусовими образами, а метрика більше не є взаємною інформацією – тепер це відстань Васерштейна. Хоча GAN – одна з кращих генеративних DNN, доступних в даний час, VAE, як і раніше, краща для систем бездротового зв'язку через наявність прихованого гаусового рівня, оскільки над гаусовими розподілами можна виконувати лінійні операції.

2.5 Теорія розподіленого штучного інтелекту

На сьогоднішній день глибоке навчання використовується лише у традиційних централізованих архітектурах, тоді як його використання у розподілених архітектурах рідко стає об'єктом досліджень. Це критичне питання з погляду перспектив створення мереж 6G, оскільки розподілені архітектури необхідні для забезпечення масштабованості і гнучкості системи зв'язку. Проте

застосування глибокого навчання у розподіленій архітектурі викличе кілька фундаментальних проблем. Наприклад, у кожного бездротового вузла буде своя власна ANN, яка буде навчена з використанням власного набору даних, отриманого на основі локальних вимірів та досвіду. В результаті різні бездротові вузли повинні навчитися поводитися на основі наборів даних, які можуть відрізнятися як за кількістю (різні вузли можуть мати різні можливості вимірювання та зберігання), так і за якістю (різні вузли можуть відчувати різні спотворення даних через відмінності в датчиках). Це може призвести до нестабільності і, в гіршому випадку, до збою бездротової мережі. Крім того, у розподіленій архітектурі кожен вузол намагатиметься оптимізувати свою власну продуктивність, а не загальносистемну результативність, через врахування інших вузлів як можливих противників. Це може викликати небажані або небезпечні ситуації, в яких бездротовий вузол може навчитися шахраювати, щоб максимізувати свою продуктивність. Отже, дуже важливо отримати тверді знання про всі ці проблеми, щоб гарантувати правильну поведінку вузлів у бездротових мережах на основі ANN. Нарешті, більшість результатів глибокого навчання не передбачають отримання розподілених масштабованих рішень, що враховують великі розміри та непередбачувану еволюцію з часом у сценаріях бездротового зв'язку 6G. В результаті створення відповідних навчальних наборів стає дуже складним завданням, оскільки загальні підходи до навчання з учителем припускають, що ANN працюватимуть в умовах, аналогічних тим, які були представлені на етапі навчання. Насправді раптові зміни трафіку та/або топології можуть зробити доступні навчальні набори марними. Отже, терміново потрібні нові методики навчання ANN, здатні передбачати або принаймні пристосовуватися до раптових змін у бездротовій мережі.

Нижче представлені дві такі методики: федеративне навчання (federated learning) та багатоагентне навчання з підкріпленням (multiagent reinforcement learning, MARL).

Федеративне навчання – це підхід до машинного навчання, при якому центральна модель навчається децентралізовано [17, 18] з використанням даних

на вузлах. Суть процесу полягає в наступному: у кожному раунді кожен вузол незалежно обчислює оновлення для центральної моделі, використовуючи свої збережені дані, а потім передає це оновлення (але не дані) на центральний сервер. Центральний сервер об'єднує оновлення, надіслані з різних вузлів, а потім обчислює покращену глобальну модель.

Сучасні мобільні пристрої зберігають у своїй пам'яті безліч даних і ці дані можна використовувати для навчання моделей. Хоча такі дані можуть значно покращити моделі, вони часто складаються з конфіденційної інформації і тому перебувають у приватній власності. Власники зазвичай не хочуть ділитися такими даними із центральним сервером з метою навчання. Щоб обійти цю проблему, сервер може надіслати центральну модель вузлам для навчання на місцях з використанням локальних даних. Після створення оновленої моделі вузли надсилають її на центральний сервер. Таким чином, центральний сервер отримуватиме велику кількість оновлень моделі від багатьох вузлів, які потім об'єднуються в покращену глобальну модель. Потім починається ще один раунд процесу навчання: центральний сервер відправляє покращену модель новим вузлам, а нові вузли навчають її далі, використовуючи свої особисті дані. Після багатьох раундів параметри моделі можуть сходитися, у результаті виходить добре навчена модель.

Основна мета федеративного навчання – відокремити навчання моделі від прямого доступу до необроблених навчальних даних, що дозволяє використовувати величезні обсяги даних, що зберігаються на вузлах. Нижче наводиться загальний опис процесу федеративного навчання, яке в основному ґрунтується на [17]. Також є безліч інших доповнень, наприклад [19, 20].

Припустимо, що модель, що навчається, є нейронною мережею, а $f_i(w)$ є функцією втрат прогнозу в прикладі (x_i, y_i) з параметром w . Також припустимо, що існує K користувачів, якими розділені дані, P_k – це множина індексів точок даних клієнта k , а $n_k = |P_k|$. Тоді мінімізована цільова функція може бути виражена як

$$f(w) = \sum_{k=1}^K \frac{n_k}{n} F_k(w),$$

де

$$F_k(w) = \frac{1}{n_k} \sum_{i \in P_k} f_i(w).$$

Нехай C буде часткою вузлів, які вибираються у кожному раунді для обчислення оновлень та градієнтів функції втрат. Якщо $C = 1$, дані у всіх вузлах використовуються для обчислення повного (нестохастичного) градієнтного спуску.

Звичайна реалізація федеративного навчання вибирає t випадкових пристроїв у кожному раунді. Центральний сервер надсилає кожному вузлу параметр мережі W_t ; потім кожен користувач обчислює $g_k = \nabla F_k(w_t)$, який є середнім градієнтом його локальних даних у поточній моделі w_t , а потім оновлює параметр $w_t^k \leftarrow (w_t^k - a g_k)$ (де a – швидкість навчання). Цей крок повторюється E разів на пристрої користувачів, щоб гарантувати відправлення найбільш надійного w_t^k назад на центральний сервер. Потім центральний сервер об'єднує ці w_t^k та застосовує оновлення $w(t+1) \leftarrow \sum_{k=1}^K \frac{n_k}{n} w_t^k$. Обсяг обчислень визначається трьома ключовими параметрами: C – частка вузлів, що беруть участь у обчисленнях у кожному раунді; E – кількість проходів, що навчаються, кожен клієнт виконує над своїм локальним набором даних у кожному раунді, і B – розмір локального міні-пакета, що використовується для оновлень клієнта. Якщо $B = \infty$ повний локальний набір даних розглядається як міні-пакет. Для користувача з n_k локальними прикладами на кожен раунд буде виконуватися $u_k = E \frac{n_k}{B}$ локальних оновлень.

Федеративне навчання дає низку переваг, включаючи такі:

- для навчання моделі можна використовувати великий обсяг реальних даних: оскільки вузлів багато і кожен вузол містить певний обсяг даних, агрегування всіх даних збільшує можливість оптимального навчання моделі;

- навчання виконується на вузлах децентралізовано, що знижує обчислювальне навантаження на центральний сервер;

- дотримуються вимоги до конфіденційності [20], оскільки користувачі завантажують на сервер лише оновлення параметрів моделі, а не власні дані.

З іншого боку, є й недоліки:

- центральний сервер все ж таки потребує певної довіри, оскільки процес перевірки оновлень моделі, надісланих користувачем, іноді може призводити до отримання деякої інформації про користувача;

- вартість зв'язку є суттєвою проблемою, оскільки ресурси зв'язку споживаються двічі на користувача: один раз для надсилання параметрів користувачу та вдруге при поверненні оновлень на сервер. Випадковий характер бездротового зв'язку робить такі оновлення досить складними;

- додаткові труднощі пов'язані з тим, що навчальні дані не беруться з незалежних і однаково розподілених джерел, оскільки кожен має свій власний набір даних, який може представляти розподіл популяції. Окремі користувачі також мають різні обсяги локальних навчальних даних, і ці відмінності можуть вплинути на збіжність алгоритму навчання;

- децентралізоване навчання складніше централізованого з точки зору тривалості та налаштування. Слід заздалегідь ретельно вибирати значення гіперпараметрів та архітектуру нейронної мережі;

- ефективність федеративного навчання нижча, ніж у централізованого методу.

У навчанні з підкріпленням [21] вирішувальник (тобто агент) прагне досягти оптимальної поведінки у присутності невизначеностей шляхом взаємодії з навколишнім середовищем, що зазвичай моделюється як марківський процес прийняття рішень. З розвитком глибокого навчання [22] було показано, що навчання з підкріпленням забезпечує максимальну продуктивність у таких галузях, як настільні ігри [23, 24], автономне водіння [5] та робототехніка [6]. В результаті огляду останніх досягнень у галузі глибокого навчання з підкріпленням визначено, що у більшості програм агент вчиться реагувати на

невизначене середовище або на одного суперника, який реагує у відповідь. Однак у багатьох важливих додатках один з одним взаємодіють багато агентів; деякі з них можуть бути пристроями, що реалізують однакові або різні стратегії для прийняття рішень щодо своїх дій. MARL має потенціал для систематичного аналізу середовища за допомогою стратегічно взаємодіючих агентів. Вивчення MARL поєднує у собі навчання з підкріпленням та методи MDP з теорією ігор, особливо з розділом теорії ігор, відомим як ігри середнього поля [8]. Він прагне надати алгоритми, що сприяють вивченню стабільних політик найкращого реагування в багатоагентній системі з достатньою кількістю агентів, що залишається серйозною проблемою в більшості випадків, оскільки зі збільшенням числа агентів зростає складність [9].

Складність поширення класичних алгоритмів навчання (таких як Q-навчання з підкріпленням, адаптивний евристичний критик або багаторукий бандит з мінімізацією жалю) для сценаріїв з багатьма користувачами залежить від балансу, який необхідно підтримувати між використанням інформації, отриманої під час навчання, і адекватним визначенням області пошуку. Наприклад, MARL середнього поля може бути дуже ефективним при великій кількості пристроїв, що взаємодіють.

Існують різні приклади додатків MARL у бездротових мережах. Наприклад, проблема повністю децентралізованого MARL розглядається в [3], де агенти розташовані у вузлах мережі зв'язку, що змінюється з часом. При цьому, розглядається два децентралізовані алгоритми «суб'єкт-критик» з апроксимацією функцій, які застосовуються до великомасштабного MARL, в якому надзвичайно велика кількість станів та кількість агентів. У децентралізованій структурі етап дії виконується кожним агентом індивідуально, без необхідності робити висновки щодо політики інших агентів. У той же час для критичного кроку приймається узгоджене оновлення через мережу. Обидва алгоритми є повністю інкрементними і можуть бути реалізовані онлайн. Для цих алгоритмів також доступний аналіз збіжності, коли функції значень істинності апроксимуються в класі лінійних функцій.

2.6 Теорія динамічної байєсівської мережі

Своєчасна та економічна обробка сигналів та інформації у мережах радіодоступу потребує використання просторово-часових залежностей між мережевими змінними. Ці залежності виникають у декількох просторово-часових областях, наприклад:

- області активації користувачів, які включають пристрої МТС/ІоТ, які повідомляють/реагують на корельовані події;
- області каналів, коли певні користувачі мають схожі характеристики розповсюдження;
- області контенту даних, коли користувачі у соціальній структурі поділяють чи запитують однаковий контент.

Ці залежності відкривають можливості використання приросту продуктивності в бездротових мережах. Тому вивчення залежностей між мережевими змінними має важливе значення для надання розширеної інформації та алгоритмів обробки сигналів для покращеного радіодоступу.

Динамічний байєсівський додаток – це звичайна структура, яка використовується для вивчення залежностей між змінними в часі, враховуючи завади та шаблони трафіку, структуру каналу та виявлення активності користувача/даних. Вивчена змінна в часі структура може використовуватися для динамічної кластеризації в безсотовій масивній МІМО, наприклад забезпечуючи поліпшені рішення радіодоступу. Багато таких проблем можуть бути сформульовані в термінах оцінки розрідженої змінної в часі зворотної коварійної матриці, яка виявляє динамічну мережу взаємозалежностей між об'єктами. Однак порівняно з інваріантним у часі додатком навчання змінної за часом мережі потребує великих обчислювальних ресурсів, оскільки існує більше параметрів та потрібен додатковий зв'язок. Крім того, стандартні методи погано масштабуються для великих мереж, де переважні методи невисокої складності та приблизного виведення. В ідеалі ці методи повинні також належно враховувати накладні витрати на навчання шляхом компромісу між ресурсами

каналу та продуктивністю. Крім того, алгоритми навчання мають працювати з неповними нелінійними вимірами; наприклад, коли дані об'єднуються з використанням каналів з обмеженою пропускну здатністю, як у випадку розподіленого МІМО.

Щоб отримати масштабовані рішення, ми використовуватимемо наближені методи виведення (такі як передача повідомлень) та їх розподілені (багатопроцесорні) версії. Передача повідомлень і наближена передача повідомлень нещодавно продемонстрували масштабовану продуктивність в узагальнених зворотних лінійних задачах і будуть відправною точкою для методів, що застосовуються тут. Існуючі рішення для статичних сценаріїв, які не залежать від часу, будуть розширені для врахування мінливості за часом. Далі ми розглянемо типові теоретичні інструменти.

Байєсівська мережа (BN) - це тип графової моделі, представленої у вигляді орієнтованого ациклічного графа. Вузли - це графові уявлення об'єктів і подій, що існують в реальному світі, зазвичай їх називають змінними або станами. Для кожної змінної в орієнтованому ациклічному графі існує функція розподілу ймовірностей, розміри та визначення якої залежать від ребер, що ведуть до змінної.

Байєсівські мережі можна визначити як окремий випадок у більш загальному класі, відомому як графова модель, в якій вузли представляють випадкові величини, а відсутність дуг – припущення про умовну незалежність між змінними. Якщо розглядати граф загалом, умовні ймовірності, структуру BN і спільний розподіл ймовірностей можна використовувати визначення граничної ймовірності чи правдоподібності кожного вузла. Ця процедура відома як маргіналізація. Розрахунок ступеня довіри у BN виконується щоразу, коли змінюється одна з цих граничних ймовірностей. Ефект спостереження поширюється по мережі, і на кожному кроці поширення оновлюються ймовірності різних вузлів. Відповідно до [1], у простих мережах гранична ймовірність, або правдоподібність кожного стану, може бути обчислена на основі знання спільних розподілів згідно з теоремою Байєса.

Більшість подій у нашому повсякденному житті не виявляються в конкретний момент часу і можуть бути описані за допомогою кількох станів спостережень, які дозволяють судити про одну завершену кінцеву подію. Модель динамічної байєсівської мережі (DBN) описує систему, яка динамічно змінюється чи розвивається з часом. Ця модель дозволяє користувачам постійно відстежувати та оновлювати систему і навіть прогнозувати її поведінку. DBN зазвичай визначається як окремий випадок однозв'язної BN, спеціально призначений для моделювання часових рядів, як зазначено в [2]. Всі вузли, ребра та ймовірності, які формують статичну інтерпретацію системи, ідентичні таким у BN. Змінні тут можуть бути позначені як стани DBN, оскільки вони включають часовий вимір, а стан системи, що описується DBN, задовольняє марківській умові, як показано на рис. 2.4.

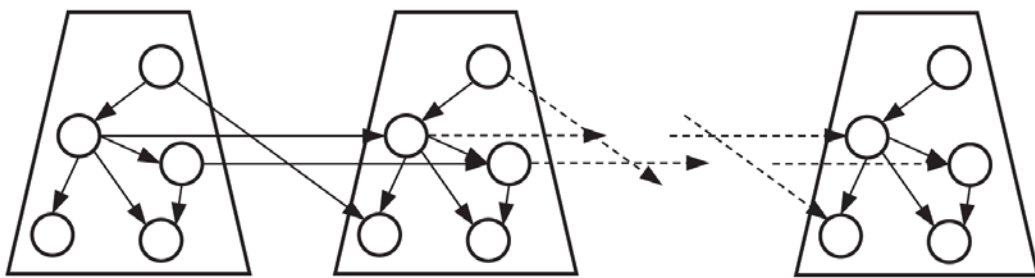


Рисунок 2.4 - Часовий інтервал, що представляє моментальний знімок процесу, який розвивається в часі процесу

Прихована марківська модель (Hidden Markov Model, HMM) – це стохастичний кінцевий автомат, у якому кожен стан генерує (випромінює) спостереження. Ми будемо використовувати X_t для позначення прихованого стану та Y_t для позначення спостереження. Якщо є K можливих станів, тоді $X_t \in \{1, K\}$. Параметри моделі включають у собі розподіл вихідного стану, модель переходу та модель спостереження. Модель переходу зазвичай характеризується умовним за поліноміальним розподілом $A(i; j) = P(X_t = j | X_{t-1} = i)$, де A – стохастична матриця. Стохастична матриця A часто розріджена, і її структура

зазвичай зображується у вигляді графа, де вузли представляють стани, а стрілки-допустимі переходи (тобто переходи з ненульовою ймовірністю).

Технічні характеристики DBN можна розділити на три категорії:

- виведення: оскільки в кожному часовому інтервалі можна спостерігати лише підмножину станів, нам необхідно обчислити всі невідомі стани DBN. Це досягається за допомогою процедури, відомої як виведення, згідно з якою різні типи DBN вимагають різних видів оцінок та розрахунків на основі їх конкретних структур. За певних умов може виявитися більш необхідним не оцінювати умовну функцію густини ймовірності, а натомість оцінювати статистику достатності функції густини ймовірності. Якщо є сильна схожість між DBN та однозв'язними BN, можна використовувати ефективний алгоритм прямого та зворотного ходу. Також для обчислення логічного виходу у DBN використовуються алгоритми згладжування та прогнозування;

- декодування послідовності: інша проблема, пов'язана з DBN, - це пошук найбільш ймовірної послідовності прихованих змінних з урахуванням спостережень. Оскільки вузли DBN можуть мати більше одного стану, необхідно визначити послідовність прихованих станів із найвищими ймовірностями. Ця процедура зазвичай позначається як декодування послідовності і може бути досягнута за допомогою алгоритму динамічного програмування Вітербі. Слід зазначити, що якщо ми маємо намір декодувати послідовність прихованих станів за допомогою алгоритму «Вітербі», необхідно мати повний набір спостережень. Варіант алгоритму відомий як скорочений алгоритм Вітербі може використовуватися після отримання фіксованої кількості спостережень;

- навчання: подання реальних проблем у структурі DBN часто вимагає введення кількох вузлів, для яких неможливо точно визначити умовні ймовірності. Навіть експертні знання не можуть запропонувати рішення для деяких умовних відношень у певних галузях. У таких обставинах необхідно вивчити ці конкретні розподіли ймовірностей. Цей процес навчання складний і ґрунтується на алгоритмі максимізації очікування або загальної максимізації очікування (GEM).

У табл. 2.1 наведено найефективніші методи залежно від того, чи відома структура. Кожен метод також має унікальні переваги та недоліки, перелічені у табл. 2.2.

Таблиця 2.1 – Методи для різних станів структури

Стан структури	Спостережуваність	Метод
Відомий	Повна	Проста статистика
Відомий	Часткова	Динамічне програмування
Невідомий	Повна	Максимальна правдивість

Таблиця 2.2 – Переваги та недоліки різних методів

Метод	Переваги	Недоліки
Проста статистика	Прості та дешеві обчислення	Вимагається повна структура і спостережуваність, що навряд можливо на практиці
Динамічне програмування	Відомий алгоритм: Віберті	Небезпечність пастки локального оптимуму
Максимальна правдивість	Алгоритм EM/GEM, хороша поведінка	Небезпечність пастки локального оптимуму

У мережах 6G існує безліч потенційних програм для DBN. Наприклад, вивчені залежності між мережними змінними можуть бути використані для потенційного збільшення продуктивності в різних бездротових послугах. Зокрема, вивчена структура, що змінюється в часі, може використовуватися для динамічної кластеризації користувачів або мережі (зазвичай масивна MIMO без сот) в різних областях (канал, активність і контент) з прямим впливом на додатки радіодоступу. Яскравим прикладом є кореляційна структура бездротового каналу, що змінюється в часі, яка, якщо її вивчити, може бути використана для підвищення продуктивності RAN. Очікується величезний приріст продуктивності щодо масового MIMO, оскільки знання структури каналу

(зокрема, каналу MIMO) надасть можливість динамічно кластеризувати користувачів RAN на основі умов їх каналу. Структура каналу та кластеризація користувачів полегшують надання схем оцінки каналу з меншими витратами за рахунок зменшення кількості ресурсів каналу для навчання, так і кількості зворотного зв'язку, пов'язаної з оцінками каналу. Байєсівська структура буде надзвичайно ефективною у цьому сценарії, оскільки вона дає переконання щодо якості задіяних оцінок. Ці переконання можна оцінити як локально на стороні користувача та на границі мережі, так і глобально на центральному сервері та макробазовій станції, щоб полегшити прийняття рішень щодо оцінки каналу та декодування даних. У контексті масових MIMO, розподілених MIMO або безсотових мереж цей підхід призведе до нових схем оцінки каналу та зворотного зв'язку. Зокрема, динамічна кластеризація користувачів впливатиме на структуру та довжину пілотних послідовностей, що використовуються для навчання (як у висхідній, так і в низхідній лінії зв'язку) стільникової системи, в якій базові станції оснащені великою кількістю антен. Це ефективно знизить накладні витрати на навчання, вивільнивши ресурси каналу передачі даних. Зокрема, структура зворотного зв'язку CSI може бути оптимізована на основі кластеризації користувачів та м'якої інформації (переконань), що виводиться процедурою байєсівського виведення. Тепер можна дослідити нові пропозиції, засновані на квантованому явному зворотному зв'язку.

Крім того, байєсівська структура поєднує виявлення активності користувачів, включаючи модель статистики активації користувачів (яку також можна вивчити). Вона поширюється на неадаптивні та адаптивні методи ймовірнісного групового тестування, щоб використати залежності між користувачами та розподілу ймовірностей, яким вони відповідають. Це особливо актуально у масових сценаріях МТС/ІоТ, де питання оцінки каналу та виявлення активності користувача мають вирішуватися спільно, щоб зменшити як службові дані, так і час очікування, пов'язані з процедурою довільного доступу. Зокрема, у додатках з масовим підключенням з двофазною передачею (початковий доступ з подальшою передачею даних) байєсівська структура оцінює оптимальну

кількість ресурсів, виділених для початкового доступу (перша фаза), порівняно з ресурсами, виділеними для передачі даних (друга фаза), з негайним перерозподілом ресурсів на етапі передачі. Загалом, очікується, що в перевантажених системах, де кількість активних користувачів набагато перевищує кількість антен на базовій станції, планування користувачів за допомогою байєсівського додатку може значно покращити загальну ефективність використання спектра. Це вплине на структури як планових, так і безгрантових (GF) схем, які орієнтовані на додатки МТС/ІоТ з передачею малих пакетів та об'єднують початковий доступ та передачу даних.

Байєсівський підхід також може застосовуватися для локалізації та прогнозування траєкторії. Крім того, розподілене прогнозування станів каналів та розташування користувачів розглядається як ключовий компонент при розробці надійних систем бездротового зв'язку. Наприклад, прогнозуючи (короткострокове) розташування користувачів або еволюцію їх кутового спектру потужності (тобто функцію, що показує середню енергію на кутову одиницю в антенній решітці), проектувальники отримують корисну інформацію про попереднє кодування навчальних символів, щоб, спираючись на один і той же пілотний сигнал, можна було отримати інформацію про стан каналу для кількох користувачів.

2.7 Висновки до розділу 2

Детально розглянуті базові визначення в галузі машинного навчання та здійснено детальний опис основ теорії штучного інтелекту. Зокрема визначено, що DBN можуть вплинути на напрямок розвитку багатьох технологій, включаючи виявлення активності користувача, оцінку каналу та відстеження мобільності.

3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ ВЕЛИКОЇ ЄМНОСТІ

3.1 Теорія електромагнітної інформації

Цей напрямок досліджень пов'язаний з формулюванням фундаментальних проблем бездротового зв'язку та будови антен, які виникають на перетині добре відомих областей електромагнітної теорії Максвелла та теорії інформації Шенона. Міждисциплінарне поле, утворене такими теоретичними проблемами хвиль та інформації, та їх вирішення можна описово назвати теорією електромагнітної інформації (ЕІТ).

Робота в цій галузі, що поєднує хвильову фізику з теорією інформації, має довгу історію, що сягає витоків теорії інформації [1] і, зокрема, до новаторських робіт по оптичним сигналам та інформації [2, 3]. Для позначення кількості ефективних вимірів комунікації було запроваджено поняття ступенів свободи (DoF). Методики визначення числа ступенів свободи з використанням хвильової теорії були розроблені ще в 1960-х роках, і з того часу подальший прогрес у цій галузі був дуже нерівномірним.

Пропускна здатність каналу визначається як максимальна взаємна інформація:

$$C = \max_{p(x)} \{I(x, y)\},$$

де x і y – вектори T_x та R_x відповідно. Щоб врахувати вплив законів електромагнетизму на пропускну здатність каналу, [4] визначається просторова пропускна здатність S як максимальна взаємна інформація між векторами T_x та R_x , а також інформація про канал (за умови, що ідеальна інформація про стан каналу відома у R_x):

$$S = \max_{p(x), E} \{I(x, \{y, G(E)\})\}.$$

Обмеження:

$$\langle x + x \rangle \leq P_T, \nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t^2} = 0, E = E_0, \forall \{r, t\} \in B,$$

де E – електричне поле, задіяне при передачі даних, B – гранична умова (залежно від середовища розсіювання), G – матриця каналу. Кількість ступенів свободи електромагнітного поля необхідно для розуміння фізичних обмежень бездротових (випромінюючих) систем зв'язку.

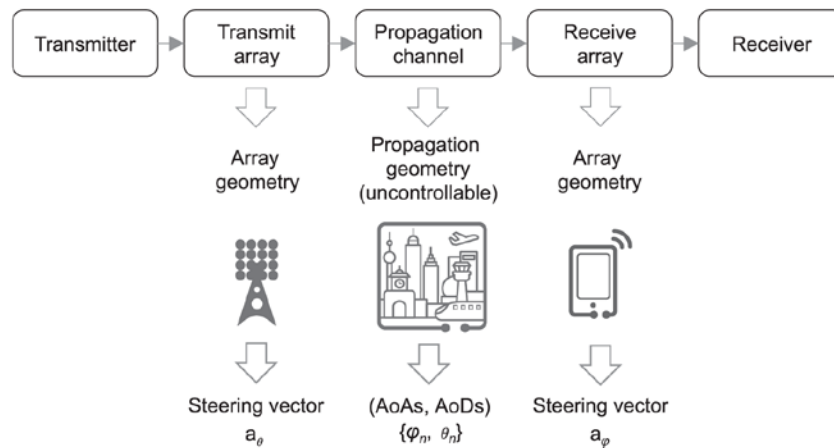


Рисунок 3.1 - Структурна схема узагальненого бездротового каналу передавання

Як показано на рис. 3.1 узагальнений бездротовий канал складається з масиву T_x , каналу поширення (середовища) і масиву R_x . Ґратки T_x і R_x впливають, принаймні, на діаграму спрямованості і взаємний вплив каналів. Складний узагальнений бездротовий канал $G(E)$ зазвичай характеризується як згортка векторів керування решіткою та багатопробієвих фізичних каналів поширення:

$$G(E) = H = f(\{\varphi_n, \theta_n\}) = \sum_n h_n a_{\theta_n} a_{\varphi_n}^H,$$

де n - кількість багатопроменевих поширень, φ_n і θ_n - кут приходу (AoA) і кут виходу (AoD) хвилі фізичних каналів поширення відповідно, a_θ і θ_n - керуючі вектори передавальної та приймальної решіток, а h_n -, реакція на вплив i -го фізичного каналу з багатопроменевим поширенням.

Після успішного розвитку зв'язку MIMO у 2000-х роках інтерес до ЕІТ неухильно зростає і привів до появи концепції каналу MIMO, що не залежить від конфігурації антени [5–8]. У будь-якому випадку оптимальна кількість антен та пропускна здатність MIMO обмежені для даного розміру апертури, незалежно від сценарію (наприклад, багате або розріджене розсіювання) [4]. В даний час масивні MIMO-системи - це зріла технологія, ключові компоненти якої включені до стандарту 5G NR. Переваги масивних MIMO з точки зору ефективності використання спектру та енергоефективності добре зрозумілі та визнані, і виникають природні питання: «Чи можливо наблизитися до меж нескінченної кількості антен?» і «Чого нам чекати в подальшому?» [9]. Відповіді можна знайти в ЕІТ, оскільки ця теорія забезпечує загальну основу для проектування бездротової мережі та аналізу продуктивності. Початкові дослідження у цьому напрямі були проведені у [10–12].

Потенційні технічні дослідження, спрямовані на збільшення кількості ступенів свободи узагальненого бездротового каналу $G(E)$, можна розділити на три категорії: (1) фізичний канал поширення, (2) діаграма спрямованості антеної решітки та взаємний вплив, (3) електромагнітні фізичні характеристики.

3.2 Фізичний канал розповсюдження

Від неконтрольованого середовища фізичного поширення до контрольованої. Відповідні дисципліни включають реконфігуровані інтелектуальні поверхні (reconfigurable intelligent surfaces, RIS) [13] і інтелектуальні відбиваючі поверхні (intelligent reflecting surfaces, IRS) [14], і тому в результаті цих досліджень все більше уваги привертає концепція інтелектуального середовища. Її головною перевагою є можливість активної

побудови повнорангової матриці каналів. На даний момент з урахуванням низки обмежень, які включають дозвіл на обладнання, накладні витрати зворотного зв'язку та мобільність клієнтських пристроїв, теоретичні межі пропускну здатності інтелектуальних середовищ невідомі. ЕІТ може відіграти ключову роль у відповідних дослідженнях.

Від незворотної поведінки траєкторії поширення електромагнітного випромінювання до зворотньої. Перетворення часу (TR) [15] є типовою дисципліною у цій галузі; воно залежить від часової симетрії розв'язання рівняння електромагнітної хвилі (також відомого як принцип оберненості оптичного шляху). Очікується, що при використанні принципу перетворення часу теорія електромагнітної інформації відіграватиме ключову роль при досягненні надвисокої роздільної здатності просторового та часового вимірювань у надширокопasmових (ultrawideband, UWB) системах.

Від електромагнітного далекого поля до ближнього поля і навіть поверхневих хвиль. Відповідні дисципліни включають велику інтелектуальну поверхню (LIS) [16] та зв'язок на поверхневих хвилях (SWC) [17]. LIS повинна враховувати просторову нестационарність сферичних хвиль і алгоритм вирівнювання приймача, у той час як SWC використовує переваги давно ігнорованих хвиль Ценнека, які щільно пов'язані біля поверхні середовища і не можуть поширюватися на навколишнє середовище. І LIS, і SWC потребують математичного інструменту ЕІТ для розробки конструкції антени та обробки мікронаноструктур.

Від інваріантної (фізичної або віртуальної) геометричної топології антенних решіток до варіативної. Крім звичайних антен, що реконфігуруються, останнім часом інтерес представляють інформаційні метаповерхні [18]. Електромагнітна модуляція у точних просторових вимірах може бути реалізована на основі гнучкого керування метаматеріалами за допомогою індексної модуляції [19]. Хоча не вважається, що чиста індексна модуляція може поліпшити канали NDF, загальновизнано, що подальший розвиток ЕІТ може відкрити нам безліч інших технічних ідей, які можуть бути реалізовані на основі метаматеріалів.

Найбільш очевидним предметом вивчення в цій галузі є надспрямованість [20]. На відміну від традиційної антенної решітки, яка зводить до мінімуму взаємний зв'язок M елементів для підтримки підсилення формування променя на рівні M за рахунок максимального коефіцієнта передачі, надспрямована антенна решітка створює сильний взаємний зв'язок за рахунок рознесення антен менш ніж на половину довжини хвилі, що призводить до підсилення формування променя більше M . З математичної точки зору підпростір матриці імпедансу включає власні вектори з невеликими власними значеннями, що представляють частину поширення векторів. З фізичної точки зору спектр плоских хвиль має велику кількість суперхвильових компонентів і хвилі зникають у кінцевому напрямку. Зниклі хвилі згасають по експоненті. ЕІТ може вирішити проблему сильного взаємного зв'язку з погляду теорії електромагнетизму Максвелла та теорії ланцюгів Кірхгофа [20, 21].

Від малих апертурних решіток до надвеликих. Типові напрями досліджень тут включають великі інтелектуальні поверхні [16] і надвеликі апертурні решітки (extremely large aperture arrays, ELAA) [22], останні з яких формують нестационарні просторові поля вздовж решіток. Щоб зменшити обчислювальне навантаження схеми ELAA-MIMO, рекомендується розділити обробку сигналів повної решітки на дрібніші непересічні підрешітки [22]. Очікується, що теорія електромагнітної інформації надасть нову основу для аналізу, що дозволяє краще розглянути властивості нестационарного просторового поля, що виникає з різних причин.

Від одинарної (або подвійної) до потрійної (або мульти-) поляризації. Хоча деякі дослідники проаналізували ефект підсилення DoF в елементах з потрійною поляризацією на початку 2011 р. [23], як результат теоретичних викладок він був відомий ще раніше, але використання тривимірних (3D) антенних решіток з потрійною поляризацією з низки причин не набуло поширення. Завдяки збільшенню пропускної спроможності MIMO на базі чотирьохпозиційної спіральної антени (QNA) тривимірні антенні решітки та пов'язані з ними вимірювання багатополаризованих каналів тепер привертають підвищену увагу

[24]. В епоху 6G вимірювання та моделювання мультиполяризованих каналів – це питання, які хвилюють дослідників, і можна зосередити увагу на деякі раніше ігноровані характеристики каналів, щоб збільшити DoF. Теорія електромагнітної інформації відіграватиме важливу роль у узагальненому моделюванні каналів.

Від лінійного моменту (енергії) до кутового. Типовим предметом робіт у цій галузі є орбітальний кутовий момент [5]. Подальші дослідження показали, що орбітальний кутовий момент навряд чи стане новим незалежним ступенем свободи (DoF), а натомість є лише окремим випадком MIMO [6]. Однак у деяких квазіпараксіальних середовищах та середовищах ближнього поля орбітальний кутовий момент може доповнювати MIMO для досягнення деяких корисних ефектів. Залишається без відповіді питання, чи можна під керівництвом ЕІТ знайти нові електромагнітні характеристики для бездротового зв'язку.

Традиційний аналіз ступеня свободи електромагнітних хвиль у просторі заснований на тому, чи є вільний простір безмежним (або має нескінченно велику межу). Складний хвильовий фронт електромагнітної хвилі спочатку розкладається на члени мультипольного розкладання зі стандартними сферичними гармоніками, а потім виходить матриця відгуку бездротового каналу за допомогою лінійної суперпозиції функції Гріна, що розповсюджується електромагнітною хвилею. Нарешті, визначається незалежний ортогональний базис у своєму підпросторі [7, 8]. В епоху 6G нові тенденції в галузі антенних решіток і каналних середовищ спонукають нас знаходити потужніші інструменти аналізу електромагнітних явищ, щоб впоратися зі складністю електромагнітного середовища, що породжується надспрямованими антенами ґратками, ELAA та інтелектуальними метаповерхнями.

Обчислювальний електромагнетизм. Обчислювальний електромагнетизм (CEM) – це нова суміжна область, у якій шукають розв'язання складних завдань теорії електромагнетизму та інженерії [9]. Вона охоплює всі галузі електромагнетизму та взаємопов'язана з теорією та практикою використання електромагнітного поля. Для розробки електромагнітних полів CEM використовується для вирішення задач моделювання, оптимізації та

проектування електромагнітних полів з більш складними фактичними сценаріями. Для теорії електромагнітного поля СЕМ може надати методи, засоби та результати для складних чисельних та аналітичних розрахунків, а також дослідити закони та математичні рівняння електромагнітних полів. Загальні методи СЕМ включають метод кінцевих елементів [10], метод кінцевих різниць у часовій області [11], матриці ліній передачі [12], метод моментів [13] та різні методи прискорення обчислень. Необхідно звернути увагу на розвиток теорії СЕМ та інструментів моделювання для автоматизованого проектування, щоб покращити наше розуміння та застосування функції Максвелла Гріна та матриці відгуку бездротового каналу у складних електромагнітних середовищах 6G. Як ми обговоримо далі, СЕМ вимагається при моделюванні каналу 6G для нових смуг спектру та сценаріїв використання.

З розвитком 6G починають з'являтися різні бездротові технології, які можуть вплинути на розвиток теорії електромагнітної інформації. До них відносяться: LIS, RIS, цифровий керований розсіювач, орбітальний кутовий момент, голографічні MIMO, обертання часу, зв'язок поверхневих хвиль, надмасивні MIMO та ELAA.

3.3 Теорія семантичної комунікації

Слово «семантика» (значення) походить від мов (природних чи формальних) та від концепції композиційності, згідно з якою значення речення визначається трьома складовими:

- правило складання речень (синтаксис);
- значення (семантика) кожного компонента;
- контекст.

Щоб дати формальне визначення семантичної комунікації, було запропоновано безліч понять семантики, але досі жодне з них не було задовільним. Відсутність загальноприйнятого математичного визначення семантики сильно обмежує подальший розвиток у цій галузі.

Проте така теорія семантичної інформації стає необхідною, коли ми очікуємо, що форма комунікації передбачає втручання людини. У традиційній теорії інформації ми не розглядаємо значення того, що передаємо, оскільки завжди буде «людський мозок», щоб інтерпретувати це. Зображення, відео, текст, мова, аудіозаписи – ця інформація інтерпретується нашим мозком. Якщо ми чуємо гавкіт собаки, ми розуміємо, що «є Собака, і вона гавкає», тому що наш мозок здатний інтерпретувати звуки. Коли інтелектуальним машинам необхідно спілкуватися без будь-якого втручання людини, вони надсилають інформацію, закодовану їхньою власною внутрішньою мовою (як люди, які використовують природну мову).

Важливим новим варіантом використання технології 6G може бути зв'язок між інтелектуальними машинами. Однак очікується, що мережа 6G не з'явиться протягом найближчих 10 років, і до цього часу машини набудуть більш просунутих можливостей, особливо з погляду композиційності.

Семантика природної мови є породжувальною. Компетентні користувачі природної мови можуть розуміти та генерувати (надавати) невизначену кількість різних пропозицій, навіть якщо словниковий запас мови обмежений. Застосовуючи кінцеве число синтаксичних правил до обмеженого словника, ми можемо генерувати і розуміти майже нескінченну кількість значних речень. Цю чудову здатність ми маємо на увазі, коли говоримо, що людська природна мова є породжувальною. Семантика природної мови також є композиційною, оскільки значні висловлювання будуються з інших значних виразів. Ми можемо проаналізувати значення такої пропозиції, як «Боб – вчитель і скрипаль», зазначивши, що вираз містить дві складові пропозиції: «Боб – вчитель» та «Боб – скрипаль». Так само значення складної пропозиції, такої як «Якщо Джон купує квитки, то або Бен, або Мері заплатять за попкорн», частково визначається значеннями складових пропозицій «Джон купує квитки», «Бен заплатить за попкорн» та «Мері заплатить за попкорн». У лінгвістиці принцип композиційності свідчить, що значення складного виразу визначається його структурою та значеннями складових його частин.

Логіка висловлювань, як і обчислення предикатів, була розроблена спеціально для моделювання такого роду композиційної семантики і передбачає очевидний взаємозв'язок між логікою та мовою: логічні системи можуть представляти чи моделювати важливі структурні особливості природної мови, такі як генеративність та композиційність. Звичайно, ми завжди можемо поставити питання, чи дійсно природна мова є генеративною і композиційною в тій мірі і тими способами, як ми це припускаємо. Про це розмірковували багато дослідників, але це емпіричне питання, яке може бути вирішене лише шляхом емпіричного дослідження. (Природна мова може не виявитися суворо композиційною, але є вагомими аргументами на користь того, що вона в цілому композиційна.) Яка нинішня ситуація з семантичною теорією інформації? Нижче наводиться уривок з монографії Шенона і Уївера 1949 року [1]: «Якщо міркувати про комунікацію в широкому сенсі, то нам бачаться проблеми на трьох рівнях. Звідси виникають три послідовні запитання:

- Рівень А. Наскільки можуть передаватися символи комунікації? (Технічна проблема).
- Рівень В. Наскільки точно передані символи передають бажане значення? (Семантична проблема).
- Рівень С. Наскільки ефективно отримане значення впливає на поведінку? (Проблема ефективності)».

Хоча можна захоплюватися спробами Шенона та Уївера представити теорію інформації як парасольку, що охоплює синтаксис, семантику та прагматику, загальні результати виглядають такими, що розчаровують. Тим, хто вважає рівняння Шенона технічними моделями передачі сигналів, розширення Уївера на питання значення та ефективності має здатися недоречним, оскільки Шенон не виявляв особливої уваги до семантичного значення повідомлення або його прагматичного впливу на слухача. Подібно до виробників сучасних пристроїв обробки звуку, його не хвилювало, чи транслював канал Бетховена чи Моцарта, чи віддає перевагу слухачу ритм року, свінг джазу чи контрапункт Баха. Натомість його теорія була спрямована на вирішення технічних проблем

передачі звуку з високою точністю відтворення. Шенон дещо насторожено ставився до масового застосування своїх математичних рівнянь до семантичних та прагматичних питань міжособистісного спілкування. Але його сумніви не поділяв Уоррен Уівер, керівник Фонду Рокфеллера та Інституту дослідження раку Слоуна-Кеттерінга, а також консультант низки приватних наукових фондів. Оpubлікована теорія Шенона поєднувалася з інтерпретуючим есе Уівера, в якому теорія інформації представлена як «надзвичайно загальна за своїм охопленням, фундаментальна щодо проблем, які вона розглядає, і класична за простотою і силою результатів, які вона отримує». В есе говорилося, що якою б не була проблема зі спілкуванням, її рішенням є скорочення втрат інформації. Проте Шенон має технічне визначення слова «інформація», яке не прирівнює інформацію до значення. Він наголошує, що «семантичні аспекти комунікації не мають відношення до інженерних аспектів». З погляду Шенона інформація належить до можливості зменшити невизначеність. Це дає шанс зменшити ентропію. Починаючи з робіт Карнапа, Бар Хіллеля та ін [2] і до сучасних концепцій, таких як семантика питань Гренендейка та Стохофа [3] або інформаційний потік Барвайса, Селігмана та ін [4], дедуктивний висновок зазвичай кваліфікують як аналітичний. У контексті інформації цю характеристику можна сформулювати так: інформація, що міститься у висновку, є підмножиною інформації, що міститься в передумові. Іншими словами, інформація, що міститься у висновку, вже міститься в передумові. У контексті функції істинності – функція, яка приймає значення істинності як вхідні дані та видає унікальне значення істинності як вихідні дані, – зазвичай використовується твердження, що дійсний дедуктивний висновок зберігає справжнє значення, що міститься в передумовах, або що безліч можливих слів, яке перевіряє набір (або кон'юнкцію) всіх передумов, є підмножиною безлічі можливих слів, що перевіряють висновок. Узгодження між двома точками зору може бути досягнуто за допомогою семантичного підходу до теорії інформації. Точніше, обидві точки зору припускають, що кожна значуща пропозиція є об'єднанням елементарних пропозицій, що не перетинаються, Z і що вони

визначають зміст пропозиції P як об'єднання всіх Z , так що заперечення Z передбачається пропозицією P .

Так само можна розглядати і нейронні мережі. Відповіді на ці запитання видно на вихідному рівні навченої нейронної мережі, а логічний зміст максимізується на цьому вихідному шарі. Однак навіть якщо "звичайне" спотворення (не враховує значення) на вихідному шарі дуже велике, вихід мережі дає нам те, що нам потрібно.

- Приклад: припустимо, що мережа навчена розпізнавати кішку на зображенні.

Логіка, пов'язана з цією нейромережею, дуже проста: один тип (кішка), відсутність композиційності та одна пропозиція:

$$\{x, Tx \in \text{кішка}\}$$

де x - вхідне зображення, а T означає True (істина). Отже, запис $\{x, Tx \in \text{кішка}\}$ означає, що зображення x представляє кішку (зображення має тип Кішка). Звичайно, нейромережа була навчена на наборі даних, поміченому людьми, і ті, хто помітив набір даних для навчання, є контекстом. Істина відносна. Семантичне повідомлення передаватиме лише один біт, що відповідає твердженню "це кішка, Істина (1) або Брехня (0)". Таким чином, DNN можна розглядати тут як кодувальник семантичного джерела, що кодує одне зображення в один біт.

Якщо говорити про більш складні ситуації, нейронна мережа може відповідати на багато запитань, наприклад мова може містити кілька пропозицій, кілька типів, кон'юнкцій і диз'юнкцій. Нейронна мережа стискатиме дані та перетворюватиме їх у пропозиції, що вимагають набагато меншої кількості біт.

Математичний підхід: очевидно, що семантичну інформацію отримати нелегко, насамперед через відсутність відповідних математичних інструментів. Однак деякі перспективні напрямки досліджень все ж таки існують. Ми не будемо тут вдаватися в подробиці, лише зазначимо, що Бодо та Беннекен у [5]

переглянули інформаційні заходи Шеннона з категоріальної/топологічної точки зору.

Для визначення інформаційних заходів рівня А Шеннон використовував аксіоматичний підхід. Він сказав: «Ця теорема та припущення, необхідні для її доказу, аж ніяк не є необхідними для цієї теорії. Вони даються в основному для того, щоб надати певну правдоподібність деяким з наших пізніших визначень. Однак справжнє обґрунтування цих визначень полягатиме у висновках, які з них випливають». Висновки показали, що він мав рацію, і в даному випадку скалярні величини, такі як ентропія та взаємна інформація, достатні та успішні.

Поширення цього аксіоматичного підходу на семантичний випадок досі не було плідним, і схоже, що зв'язки між різними точками зору на ентропію – алгебраїчними, імовірнісними, комбінаторними чи динамічними – ще погано вивчені. Основною мотивацією для запровадження категоріальної структури як формалізму, досить загального для інтеграції різних теорій, і ми вважаємо, що це може призвести до теорії семантичної інформації. Використовуючи таку структуру, [6] виявили нешенонівські інформаційні заходи, такі як ентропія Тсаліса, квантова ентропія або комбінаторна теорія інформації, де ймовірності замінені частотами.

Відправною точкою є визначення інформаційної структури. Це пара (S, E) , де S – категорія [7], що представляє змінні (морфізми S задаються обумовленням), а E – підступний функтор S в категорію вимірних просторів. Потім між інформаційними структурами визначаються морфізми, щоб створити категорію таких структур. У сучасній топології простори вивчаються за допомогою їх (ко)гомології, яка певною мірою кодує їх форми. Тут природним поняттям простору є поняття, запропоноване Гротендіком; топосом [8] та елементарними топосами тут є категорії контраваріантних функторів множин у категорії S для даної інформаційної структури та найгрубішої топології Гротендика (усі передпучки є пучками). Ці передпучки і природні перетворення з-поміж них утворюють абелеву категорію, що тягне у себе можливість визначення когомологічних функторів.

Гротендик виявив, що ентропія Шенона – це когомологія топосів. Крім того, ми можемо замінити S на іншу, більш загальну категорію. (Дослідження в даний час проводяться в синтаксичній категорії, що відповідає даній мові, яка залежить від ймовірностей пропозицій.) Крім того, в семантичному контексті інформаційні заходи можуть бути не скалярами, а фактично більшими об'єктами, такими як безлічі та множини.

І нарешті, слід відзначити дуже сильний зв'язок, який виникає між геометрією та логікою, оскільки у кожного топосу є своя внутрішня мова. Мережа 6G стимулюватиме виникнення та розвиток багатьох технологій у тандемі з теорією семантичної комунікації, таких як спільне кодування каналу джерела та стиснення джерела.

3.4 Теорія надвисокої роздільної здатності

Теорія надвисокої роздільної здатності відноситься до відображення вихідної інформації таким чином, щоб її можна було відновити якомога ближче до вихідного формату [9]. Такі події, як викиди та точки розриву, можуть бути наддозволеними з нескінченною точністю всього за декількома низькочастотними вибірками шляхом вирішення зручних опуклих планів (опуклого програмування). Очевидним варіантом використання надвисокої роздільної здатності є подальше підвищення роздільної здатності, що виходить за рамки фізичних обмежень сенсорної системи (наприклад, мікроскопа). Надроздільну здатність також можна використовувати в інших випадках, коли бажано екстраполювати дрібномасштабні деталі з даних з низькою роздільною здатністю або дозволити деталі субпікселів (наприклад, при зондуванні).

У бездротовому зв'язку сигнали, що передаються зазвичай досягають приймача декількома шляхами через відображення від об'єктів (наприклад, будівель). Припустимо, що $h(t)$ – сигнал, що передається, $z(t)$ – характеристика каналу, а d_i і t_i – комплексна амплітуда і затримка в i -му тракті; тоді отриманий сигнал у часовій області можна відобразити наступним чином:

$$x(t) = z(t) * h(t) = \sum_{i=1}^r d_i h(t - t_i),$$

де r – кількість шляхів, які надалі ми називатимемо модами (mode). Використовуючи перетворення Фур'є, ми можемо представити сигнал у спектральній області наступним чином:

$$\hat{x}(f) = \hat{z}(f) * \hat{h}(f) = \sum_{i=1}^r d_i \hat{h}(f) e^{j2\pi f t_i}.$$

Оскільки переданий сигнал $\hat{h}(f)$ відомий апріорі, дані можуть бути виражені як

$$\frac{\hat{x}(f)}{\hat{z}(f)} = \sum_{i=1}^r d_i e^{j2\pi f t_i} \quad \forall d : \hat{h}(f) \neq 0.$$

Нарешті, ми можемо отримати класичну модель оцінки параметрів теорії надвисокої роздільної здатності, сумою сигналів r мод:

$$x[t] = \sum_{i=1}^r d_i \psi(t; f_i) \quad t \in Z,$$

де d_i , - амплітуда, f_i - частота, ψ - (відома) модельна функція (наприклад, $\psi(t; f_i) = e^{j2\pi f_i t}$), а r - кількість мод або порядок моделі. Наша мета - оцінити $2r$ невідомих параметрів $\{d_i\}$ і $\{f_i\}$. Простий приклад представлений на рис. 3.2

Першою широко задіяною теорією роздільної здатності була теорема вибірки Шенона-Найквіста [10], яка вимагає, щоб частота дискретизації щонайменше вдвічі перевищувала максимальну частоту вихідної інформації. Цей критерій відомий як частота дискретизації Найквіста та гарантує ідентичність та цілісність відновленої інформації. Ця теорема заснована на перетвореннях Фур'є, які лінійно перетворюють вихідну інформацію на нову

систему координат, що містить нескінченну кількість косинусоїдальних хвильових основ. За допомогою перетворення Фур'є послідовний у часі сигнал або послідовність можуть бути представлені сумою проєкцій (внутрішнім добутком) за нескінченною кількістю основ. Частота дискретизації Найквіста забезпечує однакову роздільну здатність для всіх проєкцій.

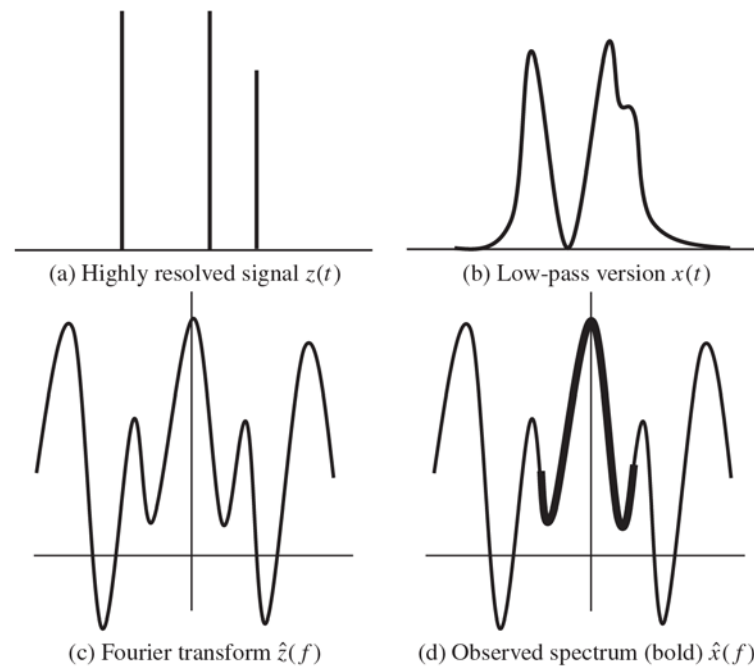


Рисунок 3.2 – Суперроздільна здатність, яка екстраполює спектр верхнього рівня (дрібні деталі) із спектру нижнього рівня (дані з низькою роздільною здатністю)

Теорема вибірки Шенона-Найквіста тривалий час домінувала при створенні систем комунікації. Вона вказувала нам, яка смуга пропускання потрібна для надійного трансивера або для кодеків, що застосовуються до аудіо, відео, зображень та аналогових сигналів. Однак за останні чотири десятиліття ми стали свідками величезного збільшення смуги частот радіозв'язку, що займається, завдяки новим поколінням бездротових систем. Смуга пропускання стає дедалі дорожчою, а несучі частоти – все вище, що ще більше стимулює вивчення теорії надвисокої роздільної здатності.

Якщо говорити про джерело сигналу, то може виникнути питання, чи дійсно необхідно однаково подавати сигнал або інформацію відповідно до його високочастотної складової, і це питання можна розділити на два запитання: (1) чи потрібен рівномірну роздільну здатність і (2) чи необхідно постійно дотримуватись частоти дискретизації Найквіста?

Рівномірна або нерівномірна роздільна здатність: щоб відповісти на це питання, ми повинні розглянути джерело або сигнал, приймач або декодер які виділяють і використовують лише деякі частотні компоненти сигналів. Прикладом цієї концепції є відеопотік, коли людський зір приділяє більше уваги передньому плану, ніж фону. Відповідно, передній план складається з високочастотних компонентів, а низькочастотні відносяться до фону. У цьому сценарії логічніше і ефективніше використовувати вищу роздільну здатність для переднього плану, ніж реалізовувати рівномірну роздільну здатність.

Це міркування дає початок другій групі широко використовуваних теорій: метод основних компонентів [11], віконне перетворення Фур'є та вейвлети. Метод головних компонентів використовує розкладання по сингулярним векторам розділення компонентів. Однак, на відміну від перетворення Фур'є, у методі головних компонентів в ролі нової координати використовується ліва або права власна матриця, а не базис Фур'є. Кодувальник JPEG застосовує метод головних компонентів для поділу та збереження основних компонентів, у той час як приймачі МІМО також використовують метод основних компонентів для детектування основних шарів. Однак метод головних компонентів втрачає деяку інформацію через рівномірне вирішення відповідно до принципу невизначеності Гейзенберга. У разі широкосмугового сигналу рівномірна роздільна здатність дає перевагу одним частинам, але погіршує інші. Щоб вирішити цю проблему, Габор спочатку запропонував віконне перетворення Фур'є - а потім і вейвлети - для реалізації множинної роздільної здатності. Якщо ми перетворимо вейвлет-сигнал назад у вихідний навколишній простір (за допомогою декодера), цілком імовірно, що роздільна здатність насправді в загальному випадку не буде однорідною. JPEG-2000 використовує вейвлети для стиснення зображень. Деякі

дослідники навіть запропонували замінити OFDM вейвлет-перетворенням для широкосмугових сигналів.

Рівномірна чи нерівномірна частота вибірки: ми також маємо враховувати те що, що високочастотні компоненти вихідного сигналу можуть ігноруватися приймачем або не мати для нього великого значення. Найбільш очевидний приклад – оцифрування звуку передачі. Оскільки людське вухо може сприймати звук лише з частотою до 20 кГц, усе, що перевищує цей поріг, немає сенсу людям. Таким чином безглуздо враховувати аудіосигнал високої чіткості за межами цього діапазону. У зв'язку з цим для оцифрування голосу з гарною якістю достатньо частоти дискретизації 8 кГц.

Це міркування породжує третю широко використовувану теорію розрідженої вибірки [12], яка заснована на розрідженості природної інформації. Наприклад, вихідна інформація x , хоча і не є розрідженою у своєму просторі, може бути лінійно перетворена на розріджене уявлення s тільки з K ненульовими елементами в новій системі координат. Перетворення може бути швидким перетворенням Фур'є (ШПФ), дискретним перетворенням Фур'є (ДПФ) або вейвлетами, як згадано вище. Для цієї розрідженої інформації x випадкова матриця розміром $M \times N$ (відома як матриця вимірювань) визначає M ($K < M \ll N$) випадкових точок вибірки, щоб виконати вибірку x у вектор y розміром $M \times 1$. Вочевидь, у дискретизується нерівномірно, та її частота дискретизації набагато нижче, ніж подвоєна максимальна частота. На стороні декодування стисла вибірка використовує норму L_1 , а не норму L_2 , щоб відкинути викиди, а для апроксимації розрідженого вектора можна використовувати апроксимацію з переслідуванням (matching pursuit, MP) або ортогональну апроксимацію з переслідуванням (orthogonal matching pursuit, OMP]. Стиснута вибірка усуває необхідність у частоті дискретизації Найквіста для вибірки розрідженої за своєю природою інформації чи сигналів. У мережі 6G датчики можуть використовувати схеми неоднорідної випадкової вибірки для значної економії смуги пропускання радіозв'язку.

Надроздільна здатність для мережі 6G: за останні 40 років ми стали свідками того, що нерівномірна роздільна здатність у багатьох відношеннях краща, ніж рівномірна, а нерівномірна вибірка краща, ніж рівномірна в таких випадках, як кодування джерела або стиснення зображення.

Теорія надвисокої роздільної здатності поєднує як неоднорідну роздільну здатність, так і неоднорідну вибірку [9] і може використовуватися в багатьох областях технології 6G.

Простим прикладом є кодування на стороні джерела для машин. Справа не лише у великій кількості машинних приймачів, підключених до систем 6G. До фону може застосовуватися більш висока роздільна здатність, ніж у алгоритмах, орієнтованих до людини, а збереження смуги пропускання передачі стратегія кодування джерела з декількома роздільними здатностями може гнучко адаптуватися до різних властивостей об'єкта.

Останній приклад у цьому розділі – нерівномірна вибірка із низьким енергоспоживанням. Системи 6G із широкою смугою частот будуть створювати проблеми для динамічного квантування, а дотримання критерію дискретизації Найквіста призведе до величезного енергоспоживання. Якщо вихідна інформація є розрідженою за своєю природою, то стає можливою нерівномірна вибірка з низьким енергоспоживанням для зниження енергоспоживання.

Теорія надвисокої роздільної здатності може вплинути на напрямки розвитку багатьох технологій, включаючи алгоритми локалізації, стислу вибірку та алгоритми бездротової візуалізації.

3.5 Висновки до розділу 3

Досліджено фундаментальні основи бездротового зв'язку та будови антен, які впливають на перетині добре відомих областей електромагнітної теорії Максвелла та теорії інформації Шенона. Зокрема обгрунтовано можливість збільшення кількості ступенів свободи узагальненого бездротового каналу $G(E)$

у розрізі: фізичного каналу поширення, діаграми спрямованості антеної решітки та взаємного впливу, електромагнітних фізичних характеристик.

Досліджено особливості виникнення та розвитку багатьох технологій у тандемі з теорією семантичної комунікації, таких як спільне кодування каналу джерела та стиснення джерела у складі мережі 6G.

Також проаналізовано теорію надвисокої роздільної здатності, яка може вплинути на напрямки розвитку багатьох технологій, включаючи алгоритми локалізації, стислу вибірку та алгоритми бездротової візуалізації.

4 ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

4.1 Енергоефективні комунікації та теорія обчислень

Проектування бездротових мереж на основі показників енергоефективності – надзвичайно складне завдання, оскільки традиційні схеми розподілу потужності призводять до безперервної передачі з використанням максимальної доступної потужності. Однак останнім часом ця думка почала змінюватися, оскільки ключовим показником ефективності для мереж 5G стала енергоефективність у бітах на джоуль, яка визначається як кількість інформації, яка може бути надійно передана на один джоуль споживаної енергії [1]. Враховуючи систематичні підходи до вирішення завдань максимізації енергоефективності структура з [3] використовується в [4] та [5] для розробки енергоефективних алгоритмів керування потужністю для масивних систем МІМО, а в [6] – для енергоефективних мереж з малими сотами. Проте всі доступні дослідження розглядають два основні шляхи витрати енергії, а саме:

- енергія передачі: енергія, що виділяється кожною антеною, що передає;
- статична енергія: енергія, що споживається всіма апаратними блоками в кожному передавачі та приймачі (наприклад, аналого-цифровим перетворювачем, цифроаналоговим перетворювачем, аналоговою фільтрацією, резервним акумулятором та системою охолодження).

Фактично аналіз енергоспоживання, необхідного для виконання обчислень при обробці інформації в цифровій області (наприклад, для обчислень при попередньому цифровому кодуванні та цифровому прийманні), погано вивчений. У цьому контексті доступні лише деякі результати, в яких використовуються принципи фундаментальної фізики/термодинаміки, щоб спочатку зрозуміти: чи дійсно цифрові обчислення повинні споживати енергію?

Дивно, але теоретично відповідь негативна: жоден фізичний принцип не наказує споживати енергію для виконання обчислень у цифровій галузі! Справді,

якщо обчислення, що виконується, не знищує жодну інформацію, то це оборотне перетворення, яке, згідно з другим законом термодинаміки, не збільшує ентропію. В результаті оборотні обчислення теоретично можуть виконуватися без витрат енергії, як вперше було помічено в [7] і [8]. Моделі машин, які реалізують цю оборотну логіку, з'явилися в [9] і [10] і працюють, зберігаючи як вихідні, так і вхідні дані кожного обчислення без стирання будь-яких бітів з пам'яті комп'ютера. Таким чином, завжди можна повернути машину у вихідний стан. Тоді виникає інше питання: чому сучасні комп'ютери ґрунтуються на булевій логіці, яка, як правило, необоротна (наприклад, не завжди можливо вивести вхідні дані операції «І» або «АБО» з її виведення)?

Перше практичне міркування полягає в тому, що навіть якщо були запропоновані моделі оборотних логічних машин, вони мають суто теоретичний характер. Насправді обробка даних виконується макроскопічними пристроями, які розсіюють макроскопічні кількості енергії. Друге міркування більш фундаментальне - навіть якби ми могли побудувати оборотну логічну машину, у неї були б нездійсненні вимоги до пам'яті, тому що їй потрібно було б зберігати абсолютно всі вихідні та вхідні дані кожної операції без видалення будь-яких бітів з пам'яті. Однак оскільки обсяг даних, які можуть бути збережені в комп'ютері, обмежений обсягом банку пам'яті [11], навіть оборотні логічні машини зрештою повинні будуть перезаписувати деякі осередки пам'яті, таким чином споживаючи енергію.

Аналогічна ситуація виникає при виявленні чи виправленні помилок передачі по каналу зв'язку. Виявлення помилки теоретично не спричиняє розсіювання енергії, та її виправлення призводить до втрати інформації (в довкілля), генеруючи ентропію. Це призводить до нереалістичної ситуації, коли, щоб уникнути генерації ентропії, система зв'язку повинна також зберігати отримані повідомлення, що містять помилки. У результаті ми приходимо до того, що необхідно враховувати незворотні операції, але дуже мало відомо про їх фундаментальні обмеження щодо розсіювання енергії в системах зв'язку. Наріжний камінь у цій галузі – робота [12] в якій розглядається лише ізольований

комп'ютер, а не повна система зв'язку. Приклади [12] стосовно систем зв'язку нечисленні.

Як сказано у попередніх розділах, до енергоефективності мереж 6G будуть пред'являтися дуже суворі вимоги. Отже, надзвичайно важливо вивчити вартість обчислень у нейромережах з погляду енергоспоживання. Крім того, необхідно вивчити енергетичний аспект у зв'язку з вимогами до затримки обробки для технологій 6G, які також дуже суворі та потребують швидких (та енергоємних) обчислень. Розуміння фундаментальних енергетичних обмежень обчислень, пов'язаних з обробкою інформації, є важливим кроком на шляху успішного розгортання бездротових мереж 6G. Як було сказано раніше, якщо передбачається нескінченний простір пам'яті, теоретично для виконання оборотних обчислень не потрібна енергія. Однак ми також побачили, що фізично неможливо побудувати мережу, яка базується лише на оборотних операціях. Отже, з інженерної точки зору важливо розуміти, якої мінімальної межі ми можемо досягти, виконуючи незворотні операції.

Оскільки сучасні комп'ютери засновані на незворотній (бульовій) логіці, необхідно заповнити теоретичну прогалину між оборотними та незворотними обчисленнями, щоб зрозуміти фундаментальні енергетичні обмеження обробки інформації. Ці дослідження виглядають проблематичними через те, що бездротові мережі стають все складнішими, і в майбутньому стануть набагато складнішими, ніж усі минулі та нинішні мережі зв'язку, що потребує розробки спеціальних теоретичних моделей для оцінки обсягу інформації, яка має бути оброблена для підтримки бажаної функціональності мережі. Крім дослідження енергії, необхідної обробки інформації, також важливо зрозуміти, як фундаментальні обмеження енергії обробки інформації пов'язані з фундаментальними обмеженнями продуктивності зв'язку. Наприклад, який оптимальний компроміс між продуктивністю зв'язку та споживанням енергії в мережі? Це питання досліджувалося лише щодо енергії, що використовується для зв'язку, тоді як майже нічого невідомо про енергію, яка використовується для обчислень, пов'язаних з обробкою інформації. Крім того, у всіх попередніх

дослідженнях розглядалися традиційні мережеві архітектури та топології, без урахування впливу використання глибокого навчання та нейромереж.

Термодинаміка у додатку до комунікацій та теорії обчислень здатна допомогти у розробці нових алгоритмів для енергоефективних мереж 6G.

4.2 Теорія зеленого штучного інтелекту

У майбутньому ШІ зазнає неймовірної еволюції і проникне у всі верстви суспільства. Під час цього процесу ШІ та зв'язок зближуватимуться, при цьому або мережа зв'язку обслуговуватиме та забезпечуватиме конвеєри даних для додатків ШІ, або ШІ підвищить ефективність передачі даних у мережі зв'язку. Проте споживання електроенергії та викиди вуглецю внаслідок використання штучним інтелектом великих обчислювальних ресурсів є дуже неприємним чинником як з погляду захисту довкілля, і з погляду економічних вигод. З цієї причини зелений ШІ привертає дедалі більшу увагу у науковому та інженерному співтовариствах [15, 16], і перехід від червоного ШІ до зеленого суттєво вплине на принципи проектування мереж бездротового зв'язку наступного покоління.

Червоний ШІ використовує модель, яка навчається за допомогою навчального набору даних та оцінюється за допомогою тестового набору даних. Щоб розробити червону модель ШІ, нам зазвичай потрібно використовувати набір навчальних даних для ітеративного коригування гіперпараметрів. Відповідно, зелений ШІ відноситься до рішення, в якому моделі, алгоритми та обладнання дають нові результати без збільшення обчислювальних витрат та фактично знижують їх в ідеальних сценаріях [15].

Як правило, вартість обчислень моделі ШІ пропорційна добутку трьох ключових факторів: вартості виконання моделі на одній вибірці, розміру навчального набору даних та кількості експериментів з гіперпараметрами. Кількість операцій з плаваючою комою, внаслідок використання різних алгоритмів для реалізації однієї і тієї ж функції ШІ, зменшилась у 44 рази з 2012 по 2019 рік, що еквівалентно подвоєнню ефективності алгоритму кожні 16

місяців протягом семи років [17]. Тим часом через швидке розширення наборів навчальних даних та гіперпараметрів і, зокрема, через надмірне прагнення до підвищення точності навчання на основі величезних обчислювальних ресурсів споживання електроенергії ШІ збільшилося в 300000 разів з 2012 по 2018 рік, що еквівалентно подвоєнню 3,4 місяці [18]. Емма Струбелл та ін. запропонували оцінку споживання енергії штучним інтелектом (p_t) та викидів CO_2 (CO_{2e}) [16]:

$$p_t = \frac{PUE \times t \times (p_c + p_r + gp_g)}{1000} \text{ (кВтч)},$$

$$\text{CO}_{2e} = \text{CUP} \times p_t \text{ (кг)},$$

де t – очікуваний загальний час, витрачений на навчання моделі;

p_c , p_r та p_g являють собою середнє енергоспоживання (у ватах) від усіх сокетів ЦП, від усіх сокетів DRAM (основної пам'яті) та кожного графічного процесора відповідно під час навчання;

g – кількість графічних процесорів, що використовуються для прискорення навчання.

PUE – це скорочення від power usage effectiveness, що означає ефективність використання енергії з урахуванням додаткової енергії, необхідної для підтримки обчислювальної інфраструктури (насамперед охолодження). Середній світовий показник PUE центрів обробки даних становить 1,58 [19]. CUP – це скорочення від carbon dioxide per unit power (кількість вуглекислого газу на одиницю потужності), яке залежить від рівня розвитку місцевої енергетики.

Агентство з охорони навколишнього природного середовища США надало середній коефіцієнт виробництва CO_2 0,433 кг/кВтч [20].

На прикладі моделі NLP (обробка природної мови) показано, що споживання енергії та викиди вуглецю, що відповідають різним моделям ШІ та апаратного забезпечення, не можна ігнорувати з економічної точки зору. Середня вартість електроенергії в США у 2018 році склала 0,12 долара США за

кВтг без урахування втрат виробітку. Зокрема, будь-які моделі, чутливі до наборів даних та гіперпараметрів, будуть дуже дорогими, оскільки вони можуть потребувати перенавчання щоразу, коли виникає нова ситуація.

В останні роки з'явилася величезна кількість наукових статей з ШІ в різних сферах застосування, включаючи ШІ, що використовується в мережах бездротового зв'язку. Однак мало уваги приділяється проблемам енергоспоживання і викидів вуглецю, що зумовлені величезним обсягом прямих неоптимізованих обчислень під час впровадження ШІ. Спільнота ШІ намагається привернути увагу дослідників до цих проблем і в даний час виступає за наступне: (1) повідомляти про час навчання та чутливість до гіперпараметрів у публікаціях з ШІ; (2) надавати рівноправний доступ до обчислювальних ресурсів під час реалізації ШІ та (3) приділяти пріоритетну увагу обчислювальній ефективності апаратного забезпечення та алгоритмів штучного інтелекту.

Щоб виміряти ефективність, Рой Шварц та ін. запропонували повідомляти обсяг роботи, необхідної для отримання результату (для навчання моделі та налаштування гіперпараметрів) у додатках ШІ [15]. При складанні звіту про обсяг роботи, виконаної додатком ШІ, необхідно виміряти певні показники, щоб забезпечити справедливе порівняння між різними моделями. Йдеться про такі показники:

- викиди вуглецю: кількість, яку зелений ШІ прагне мінімізувати;
- енергоспоживання: пов'язане з викидами вуглецю, але не залежить від часу та місця;
- витрачений реальний час: загальний час роботи для створення результату ШІ, який є природним показником ефективності;
- кількість параметрів: кількість параметрів (навчальних чи загальних), що використовуються моделлю ШІ, яка є ще одним поширеним показником ефективності;
- операції з плаваючою комою: конкретна міра ефективності у процесі генерації результату ШІ.

В результаті, запропоновано концепцію зеленого ШІ під назвою Oncefor-All (раз і назавжди), згідно з якою ми навчаємо одну мережу, а потім спеціалізуємо її при розгортанні, щоб забезпечити ефективний логічний висновок на багатьох пристроях і вкластися в різні обмеження ресурсів. Традиційні підходи зводяться або до проектування вручну, або до пошуку нейронної архітектури, щоб знайти спеціалізовану нейронну мережу та навчити її з нуля для кожного випадку, що неприпустимо з обчислювальної точки зору та генерує велику кількість викидів CO₂. І навпаки, універсальна мережа підтримує різні архітектурні налаштування за рахунок поділу навчання та пошуку, і можна швидко отримати спеціалізовану підмережу без додаткового навчання.

Повертаючись до проектування бездротових комунікаційних мереж наступного покоління, слід зазначити, що традиційні алгоритми оптимізації ШІ (такі як федеративне навчання) зазвичай розглядають пропускну здатність або затримку бездротових з'єднань як вагу для розподіленого мультипроцесорного обміну даними, без урахування граничних значень енергії потужності між різними пристроями у різних регіонах. Цей неоднозначний розгляд обмежень енергії ШІ або витрат на електроенергію може призвести до великого розходження між проектом бездротової мережі та фактичним розгортанням ШІ в майбутньому. З цієї причини ми виступаємо за необхідність надавати однакове значення зеленому ШІ та зеленим комунікаціям. З самого початку проектування архітектури слід повною мірою враховувати вплив моделей, алгоритмів та обладнання штучного інтелекту на енергоспоживання, щоб забезпечити економічну вигоду клієнтам з відповідними операційними витратами системи.

В епоху 6G виникне потреба в архітектурі енергоефективних обчислень, які мають враховувати енергетичні обмеження ШІ. Втім, це важливо вже сьогодні, оскільки такі міркування однаково актуальні у нинішніх мережах 4G та 5G.

4.3 Висновки до розділу 4

Досліджено вплив моделей, алгоритмів та обладнання штучного інтелекту на енергоспоживання, що забезпечить економічну вигоду клієнтам з відповідними операційними витратами системи.

Визначено фундаментальні енергетичні обмеження обчислень, що пов'язані з обробкою інформації, які є важливим кроком на шляху успішного розгортання бездротових мереж 6G.

Досліджено потребу в архітектурі енергоефективних обчислень, які мають враховувати енергетичні обмеження ШІ. Втім, це важливо вже сьогодні, оскільки такі міркування однаково актуальні у нинішніх мережах 4G та 5G.

5 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 «Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання» 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) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

5.1 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 «Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання» 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. 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – 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	-	65	-
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	56	-	59
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)	-	-	-

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами (продовження)

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	-	-	-
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	-	-	-
Середнє значення балів експертів		60,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як принципово нова, тобто робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження.

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	-	-	-
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	60	63	61
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	-	-	-
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	-	-	-
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	-	-	-
Середнє значення балів експертів	61,3		

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 [25]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (5.1)$$

де $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 60,0, k_{\text{теор}} = 61,3$ балів;

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

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 60,0 + 0,4 \cdot 61,33 = 60,53 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{\text{нау}}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – 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 «Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання», даний рівень становить 60,53 балів і відповідає статусу -

середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.2.1 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 [25]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

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, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 12800,00 \cdot 44 / 21 = 26819,05 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
1. Керівник проекту	12800,00	609,52	44	26819,05
2. Ст. науковий співробітник галузі штучного інтелекту	11850,00	564,29	40	22571,43
3. Інженер розробник радіоелектронної апаратури	11360,00	540,95	32	17310,48
4. Консультант-аналітик з питань машинного навчання	16400,00	780,95	20	15619,05
5. Аналітик з питань математичного моделювання штучного інтелекту	18200,00	866,67	20	17333,33
6. Технік вищої категорії	8000,00	380,95	15	5714,29
Всього				105367,62

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

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:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=2600,00$ грн; на 01.07.2022 року.

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду [25];

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 $T_p = 21$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 2600,00 \cdot 1,10 \cdot 1,65 / (21 \cdot 8) = 28,09 \text{ грн.}$$

$$З_{р1} = 28,09 \cdot 6,20 = 174,15 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.5 – 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
1. Встановлення офісного обладнання	6,20	2	1,10	28,09	174,15

Таблиця 5.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників
(продовження)

2. Інсталяція програмного забезпечення	9,18	3	1,35	34,47	316,46
3. Компіляція програмних модулів	199,38	5	1,70	43,41	8655,23
4. Відлагодження програмних модулів	41,40	5	1,70	43,41	1797,20
5. Формування радіоелектронної моделі апаратного комплексу	92,00	4	1,50	38,30	3523,93
6. Встановлення модулів штучного інтелекту	24,00	5	1,70	43,41	1041,86
7. Монтаж імітаторів мереж	24,00	6	2,00	51,07	1225,71
8. Формування бази даних результатів вимірювань	100,00	3	1,35	34,47	3447,32
Всього					20181,87

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $H_{\text{доп}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{дод}} = (105367,62 + 20181,87) \cdot 11 / 100\% = 13810,44 \text{ грн.}$$

5.2.2 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:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (5.6)$$

де $H_{\text{зн}}$ – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (105367,62 + 20181,87 + 13810,44) \cdot 22 / 100\% = 30659,19 \text{ грн.}$$

5.2.3 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 «Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання».

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:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\epsilon j}, \quad (5.7)$$

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;

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

$M_1 = 3,00 \cdot 275,00 \cdot 1,1 - 0,000 \cdot 0,00 = 907,50$ грн.

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.6 – 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
1. Папір офісний	275,00	3,00	0,000	0,00	907,50
2. Приладдя канцелярське	165,00	4,00	0,000	0,00	726,00
3. Тонер для картриджа	1280,00	0,023	0,000	0,00	32,38
4. Папір для записів	110,00	4,00	0,000	0,00	484,00
5. Органайзер	165,00	2,00	0,000	0,00	363,00
6. Диск оптичний	20,00	2,00	0,000	0,00	44,00
7. FLASH-пам'ять MeBoll 64G	560,00	1,00	0,000	0,00	616,00
Всього					3172,88

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

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

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

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

$$K_e = 1 \cdot 16800,00 \cdot 1,1 = 18480,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
1. Інтерфейс вузла доступу	1	16800,00	18480,00
Всього			18480,00

5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;
 $C_{\text{пр.}i}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 25900,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 28490,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
1. Функціональна модель мережі безпроводового доступу	1	25900,00	28490,00
2. Термінал (імітатор навантаження)	1	11500,00	12650,00
3. Термінал (імітатор приймача)	1	9500,00	10450,00
4. Програмований комутатор	1	5800,00	6380,00
Всього			57970,00

5.2.6 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:

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k C_{inpz} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i, \quad (5.10)$$

де C_{inpz} – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{npz.i}$ – 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.

$$B_{npz} = 8300,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 9130,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
1. ОС Windows	1	8300,00	9130,00
2. Прикладний пакет Microsoft Office	1	7000,00	7700,00
3. Пакет Visual System Simulator	1	5250,00	5775,00
4. Пакет Microwave Office	1	6800,00	7480,00
5. Пакет Matlab 2020	1	4600,00	5060,00
Всього			35145,00

5.2.7 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:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б}}{T_{в}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.11)$$

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;

$T_{в}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (22800,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 1266,67 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
1. Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс	22800,00	3	2	1266,67
2. Метрологічний комплекс МСХ13-А54	11000,00	5	2	366,67
3. Програмне забезпечення підтримки мереж	16500,00	3	2	916,67
4. Місце оператора спеціалізоване	9700,00	5	2	323,33
5. Офісна оргтехніка	12505,00	4	2	521,04
6. Дослідницька лабораторія	285000,00	25	1	950,00
Всього				4344,38

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (5.12)$$

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 $C_e = 6,12$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,56 \cdot 320,0 \cdot 6,12 \cdot 0,95 / 0,97 = 1096,70 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
1. Комп'ютеризований програмно-аналітичний комплекс	0,56	320,0	1096,70
2. Метрологічний комплекс МСХ13-А54	0,42	160,0	411,26
3. Місце оператора спеціалізоване	0,10	320,0	195,84
4. Офісна оргтехніка	0,80	60,0	293,76
5. Термінал (імітатор навантаження)	0,32	160,0	313,34

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію (продовження)

6. Термінал (імітатор приймача)	0,32	160,0	313,34
7. Програмований комутатор	0,05	160,0	48,96
Всього			2673,22

5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання» 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:

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (5.13)$$

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cv} = 25\%$.

$$B_{cv} = (105367,62 + 20181,87) \cdot 25 / 100\% = 31387,37 \text{ грн.}$$

5.2.10 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:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.14)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{cn} = 45\%$.

$$B_{cn} = (105367,62 + 20181,87) \cdot 45 / 100\% = 56497,27 \text{ грн.}$$

5.2.11 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:

$$I_g = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ig}}{100\%}, \quad (5.15)$$

де H_{ig} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{ig} = 95\%$.

$$I_g = (105367,62 + 20181,87) \cdot 95 / 100\% = 119272,02 \text{ грн.}$$

5.2.12 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:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 145\%$.

$$B_{нзв} = (105367,62 + 20181,87) \cdot 145 / 100\% = 182046,76 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{доп} + Z_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (5.17)$$

$$B_{заг} = 105367,62 + 20181,87 + 13810,44 + 30659,18544 + 3172,88 + 18480,00 + 57970,00 + 35145,00 + 4344,38 + 2673,22 + 31387,37 + 56497,27 + 119272,02 + 182046,76 = 681008,01 \text{ грн.}$$

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

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.18)$$

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

$$ZB = 681008,01 / 0,9 = 756675,57 \text{ грн.}$$

5.3 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 «Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання» 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:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.19)$$

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 $n=3$;

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 $B = 756675,57$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,17$ років, (2 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [25].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 3 \cdot 4 / 756,7 \cdot 0,17 = 6,09.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5.4 Висновок до розділу 5

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання» складають 756675,57 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Мережі доступу на основі

штучного інтелекту та машинного навчання» 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.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Важливим нормативним документом підприємства, без якого на підприємстві неможлива ефективна робота зі створення належних умов праці, є положення про створення служби охорони праці. Більшість власників підприємств сьогодні не бажають створювати служби охорони праці з урахуванням філій або відокремлених структурних підрозділів. Попри це, в нашій країні є чимало позитивних прикладів розв'язання цієї проблеми. Там, де є розуміння і бажання керівника підприємства, це питання вирішується належним чином.

Дослідження мереж доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання відбувалося в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На розробника, згідно ГОСТ 12.0.003-74 [27], мали 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; відсутність чи нестача природного освітлення.

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

6.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

6.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Організація робочого місця – це система заходів щодо його спеціалізації, оснащення необхідними засобами і предметами праці, їхнього розміщення на робочому місці, його зовнішнього оформлення і створення належних умов праці.

Конкретний зміст цих заходів визначається характером і спеціалізацією робочого місця, його видом і значенням у виробничому процесі.

Робоче місце працівника складається зі столу, крісла і підніжки, які дають змогу зберігати раціональну робочу позу впродовж усього робочого дня.

Конструкція робочого столу відповідає сучасним вимогам ергономіки і забезпечує оптимальне розміщення на робочій поверхні використовуваного обладнання (дисплея, клавіатури, принтера) і документів.

Робочий стілець підйомно-поворотний з можливістю регулювання за висотою та кутом нахилу сидіння та спинки. Поверхня сидіння плоска, передній край - заокруглений. Регулювання за кожним із параметрів здійснюється незалежно, легко і надійно фіксується.

Конструкція робочого місця користувача ПК має забезпечувати підтримання оптимальної робочої пози з такими ергономічними характеристиками:

- ступні ніг – на підлозі або на підставці для ніг;
- стегна – в горизонтальній площині;
- передпліччя – вертикально;
- лікті – під кутом 70 – 90 град. до вертикальної площини;
- зап'ястя зігнуті під кутом не більше 20 град. відносно горизонтальної площини,
- нахил голови – 15 – 20 град. відносно вертикальної площини [31].

Розташування екрана ВДТ забезпечує зручність зорового спостереження у вертикальній площині під кутом $+30^\circ$ до нормальної лінії погляду дослідника.

Висота робочої поверхні столу для ПК знаходиться в межах 680 – 800 мм, а ширина – забезпечує можливість виконання операцій в зоні досяжності моторного поля.

У приміщеннях з персональними комп'ютерами слід щоденно проводити вологе прибирання. Також в цих приміщеннях повинні бути медичні аптечки першої допомоги.

6.1.2 Електробезпека приміщення

Лінія електромережі для живлення персональних комп'ютерів, їх периферійних пристроїв (принтер, сканер тощо) в приміщенні виконана як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів.

Нульовий захисний провід прокладено від стійки групового розподільчого щита, розподільчого пункту до розеток живлення. Не допускається підключення на щиті до одного контактного затискача нульового робочого та нульового захисного провідників [32].

Усі провідники відповідають номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму тощо.

Персональні комп'ютери, периферійні пристрої до електромережі тільки з допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. Штепсельні з'єднання та електророзетки крім контактів фазового та нульового робочого провідників мають 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.

Категорія умов з небезпеки електротравматизму – без підвищеної небезпеки [32].

Для запобігання електротравмам у приміщенні здійснюються:

- 1) ізоляція нормально струмоведучих елементів електроустаткування відповідно з вимогами нормативів;
- 2) захисне заземлення;
- 3) систематичне проходження інструктажу з електробезпеки.

6.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

6.2.1 Мікроклімат

На самопочуття та стан здоров'я людини впливає мікроклімат виробничих приміщень, який визначається дією на організм людини температури, вологості, рухомості повітря і теплового випромінювання. Виробничий мікроклімат, як правило, відрізняється значною мінливістю, нерівномірністю по горизонталі та вертикалі, різноманітністю сполучень температури, вологості, рухомості повітря, інтенсивності випромінювання залежно від особливостей технології виробництва, кліматичних особливостей місцевості, конструкцій споруд, організації повітрообміну із зовнішнім середовищем.

Робота дослідника мереж доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання відноситься до категорії легких робіт Ia. В табл. 6.1. наведені оптимальні параметри мікроклімату в приміщеннях, де виконуються роботи операторського типу.

Таблиця 6.1 – 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 забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено загальне опалення будівлі та заходи з утеплення зовнішніх стін будівлі. Крім того, забезпечення допустимих метеорологічних

умов праці в приміщенні здійснюється за допомогою системи припливно-втяжної вентиляції та регулярного провітрювання.

6.2.2 Склад повітря робочої зони

Нормуються шкідливі речовини у повітря робочої зони згідно ДСН 3.3.6.042-99 [30].

Гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин для повітря робочої зони під час розробки інформаційної технології захисту даних в «хмарних» комп'ютерних обчисленнях наведені у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони.

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Озон	0,16	0,01	1
Вуглекислий газ (CO ₂)	3	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється видалення шкідливих речовин, що потрапляють у повітря робочої зони, за рахунок механічної вентиляції. Кількість пилу, що наявна в приміщенні, зменшується за допомогою систематичного вологого прибирання.

6.2.3 Виробниче освітлення

У приміщенні, де виконуються дослідження використовується штучне та природне освітлення.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні, які необхідно

забезпечити під час виконання роботи зазначені у таблиці 6.4 (відповідно ДБН В.2.5-28-2018 [28]):

Таблиця 6.4 - 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, %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

1. Відносно вікон робоче місце розміщене так, щоб природне світло було з лівого боку.
2. Робоче місце дослідника, обладнане ПК розташоване так, щоб уникнути попадання в очі прямого світла.
3. Джерела штучного світла розташовані з обох сторін від екрану паралельно напрямку зору.
4. Щоб уникнути світових блисків від екрану, клавіатури, освітлювальних пристроїв, сонця в напрямку очей необхідно застосовувати антиблискові сітки, спеціальні фільтри для екрану, захисні козирки, жалюзі на вікнах.
5. Вікна приміщень повинні мати регульовальні пристрої для відкривання.

6.2.4 Виробничий шум

У робочому приміщенні мають місце шуми механічного і аеродинамічного походження, широкосмугові із аперіодичним підсиленням при роботі принтерів.

Допустимі рівні звукового тиску та рівні звуку L_A під час роботи згідно з вимогами ДСН 3.3.6.037-99 [29] наведені у таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного шуму

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 допустимих параметрів шуму в приміщенні передбачено використання звукопоглинаючих матеріалів та пасивного охолодження ПК.

6.2.5 Виробничі випромінювання

Ступінь впливу електромагнітних випромінювань на організм людини залежить від діапазону частот, інтенсивності впливу відповідних чинників, тривалості опромінення, характеру випромінювання, режиму опромінення, розмірів поверхні тіла, яка опромінюється, та індивідуальних особливостей організму.

Під час проведення досліджень на ПК на працівника діє електромагнітне випромінювання (ЕМВ), що створюється ПК. Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітору комп'ютера представлені в табл. 6.6.

Таблиця 6.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	10 В/м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	0,3 А/м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати:	для дорослих користувачів 20кВ/м для дітей 15кВ/м

Заходи щодо зменшення впливу на працівника електромагнітного випромінювання: оптимальна організація робочого місця, доцільне розміщення технологічного устаткування, дотримання гігієнічно-обґрунтованих режимів праці та відпочинку, зменшення часу перебування у зоні опромінення.

6.2.6 Психофізіологічні фактори

Можлива психоемоційна напруга при тривалій роботі з екраном відеомонітору, тому для забезпечення безпечності праці пропонуються наступні рішення:

Працюючі за комп'ютером повинні дотримуватися наступного режиму праці:

При введенні даних, читанні інформації з екрану безперервна тривалість роботи не повинна перевищувати 4-х годин при 8-годинному робочому дні;

Через кожну годину роботи необхідно робити перерву на 5-10 хвилин, а через 2 години на 15 хвилин;

Перерви використовувати для зорового та фізичного розвантажування:

Стоячи або сидячи робити похитування головою ліворуч-праворуч (темп швидкий);

Стоячи або сидячи робити нахили голови уперед-назад (темп помірний);

Масаж лоба, злегка його погладжуючи, а також погладжуючи ділянки над бровами у напрямку до скронь;

Стоячи або сидячи проводити самомасаж шиї та потилиці, погладжуючи потилицю та шию у напрямку до торса.

6.3 Спеціальна та санітарна обробка при радіаційному забрудненні

Важливими заходами захисту населення у випадку радіаційного чи хімічного забруднення місцевості є проведення спеціальної та санітарної обробки.

Спеціальна обробка проводиться з метою знезаражування радіоактивних чи небезпечних хімічних речовин. Знезаражування радіоактивних речовин проводиться шляхом дезактивації, хімічних – дегазації.

Дезактивація – це видалення радіоактивних речовин (РР) з поверхні різних об'єктів, одягу, взуття, а також з продуктів харчування і води. Вона проводиться шляхом промивання струменем дезактивууючих розчинів, обтиранням і зм'ятанням пилю вологими щітками, ганчірками, тампонами тощо. Залежно від умов, що склалися, дезактивація може бути повною і частковою.

Дегазація – це заходи, спрямовані на знезаражування або видалення отруйних і сильнодіючих ядучих речовин. Дегазацію можна проводити хімічним, фізичним і механічними способами. При хімічному способі застосовують нейтралізуючі або хімічні речовини, що руйнують отруйні і небезпечні хімічні сполуки. Фізичний спосіб передбачає випаровування, поглинання ОР і НХР різними матеріалами, руйнування високою температурою і вогнем. Механічні способи дегазації застосовують для зняття зараженого шару ґрунту, снігу, покриття на глибину проникнення ОР і НХР та поховання його.

Санітарна обробка є складовою частиною спеціальної обробки. Це комплекс заходів з ліквідації забруднення РР, зараження небезпечними ОР і НХР, хімічними і біологічними засобами особового складу формувань ЦЗ і населення. Санітарна обробка поділяється на часткову та повну.

Часткова санітарна обробка – механічне очищення і обробка відкритих ділянок шкіри, одягу, взуття, засобів індивідуального захисту або обробка за допомогою індивідуальних протихімічних пакетів. Вона проводиться після зараження безпосередньо у зоні радіоактивного чи хімічного забруднення і повторюється після виходу із зони.

Повна санітарна обробка спрямована на повне знезараження поверхні тіла людини, одягу, взуття від РР, ОР та БЗ. Вона передбачає миття людей з одночасним знезаражуванням одягу або його заміною. Для проведення повної санітарної обробки облаштовуються спеціальні місця або пункти.

6.4 Висновки до розділу 6

В ході виконання було розглянуто технічні рішення з безпечного виконання робіт, зокрема: технічні рішення з організації робочого місця під час проектування та електробезпека приміщення; технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії; особливості організації оповіщення населення.

Отже основною метою даної частини розділу було дослідження безпеки роботи інфокомунікаційних радіомереж на основі штучного інтелекту та розробка дієвих заходів по підвищенню безпеки роботи цієї системи в умовах радіаційного впливу.

ВИСНОВКИ

Досліджено нові можливості для бездротових технологій з використанням технології 6G. Зокрема, з погляду всіх можливих застосувань 6G досліджені варіанти використання 6G є просто окремими прикладами того, що чекає на нас у майбутньому.

Здійснено чисельний аналіз вимог до продуктивності для розглянутих типових випадках використання мережі доступу з врахуванням набору цільових КРІ. Зокрема, з погляду швидкості передачі, найвищі вимоги пред'являє тривимірний голографічний зв'язок. Що стосується затримки передачі, то найвищі вимоги пред'являють дистанційна робота у високодинамічних середовищах та промислове керування рухом. Надзвичайно жорсткі вимоги до джитера та надійності висувають сценарії використання детермінованого зв'язку. Визначено варіанти використання IoT у майбутніх розумних містах та розумному житті, які формують вимоги до щільності підключення та часу автономної роботи сенсора. Також досліджено нові варіанти використання мобільних мереж, такі як зондування та штучний інтелект, які спричиняють нові показники якості інформаційних послуг – роздільну здатність зондування та ймовірність виведення. В результаті, визначено, що для деяких нових застосувань можуть знадобитися подальші дослідження пов'язаних з ними показників, наприклад, гнучкості та масштабованості для підтримки власних сервісів AI та рівня надійності мережі.

Досліджено особливості розвитку бездротових мереж за сценарієм, згідно з яким інфраструктура зв'язку зливатиметься з навколишнім середовищем. В результаті, визначено, що мережі 5G рухаються у напрямку щільного розгортання базових станцій та антенних решіток, а технологія 6G перейде на наступний рівень, оснастивши об'єкти в галузі зв'язку, такі як будівлі, стіни, автомобілі та дорожні знаки, інтелектуальними поверхнями, здатними підсилювати електромагнітні сигнали, виконувати обчислення та зберігати дані.

Досліджено комунікаційне середовище при експоненційному збільшенні кількості підключених пристроїв, що потребують більш високопродуктивних послуг, яке в кінцевому рахунку буде перетворено на інтелектуальну бездротову мережу, що характеризується безпрецедентним рівнем щільності, стохастичності та неоднорідності, а також дуже великими розмірами. Визначено необхідність зміна парадигми, оскільки у такому складному сценарії традиційні мережеві архітектури втратять працездатність. В результаті, розглянуто теоретичні основи комунікацій в інтелектуальній бездротовій мережі 6G, встановивши базис для обчислення теоретичних меж продуктивності, а також розробки прикладних алгоритмів для наближення до цих меж.

У підсумку, прийнято, що доцільно виходити з припущення, що мережева інфраструктура складається з кількох розподілених сегментів, кожен з яких наділений можливостями штучного інтелекту та діє як підсистема, здатна приймати незалежні рішення. Це бачення може бути реалізовано за допомогою взаємодії теоретичних інструментів з множини дисциплін, що беруть початок у фундаментальній математиці та фізиці. Однак важливо відзначити, що деякі прогалини у знаннях залишаються, і їх необхідно усунути, щоб ефективно створити єдину структуру.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 5GACIA 5G alliance for connected industries and automation, «White paper, 5G for connected industries & automation (Second Edition)», 2018, accessed Sept. 20, 2020.
2. 5GAA, White paper, C-V2X use cases, methodology, examples and service level requirements, 2019.
3. ITU Broadband Commission for Sustainable Development, State of broadband report 2019, 2020.
4. 3GPP, Service requirements for the 5G system, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 22.261, 07 2020, version 17.3.0.
5. E. Mazareanu, Air transportation – statistics & facts, 2020.
6. D. Madhubabu and A. Thakre, Long-short term memory based channel prediction for siso system, in Proc. 2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). IEEE, 2019, pp. 1–5.
7. A. E. Eshratifar, A. Esmaili, and M. Pedram, Bottleneck: A deep learning architecture for intelligent mobile cloud computing services, in Proc. 2019 IEEE/ACM International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED). IEEE, 2019, pp. 1–6.
8. D. P. Kingma and M. Welling, An introduction to variational autoencoders, Foundations and Trends in Machine Learning, vol. 12, no. 4, 2019.
9. E. Björnson, L. Sanguinetti, H. Wymeersch, J. Hoydis, and T. L. Marzetta, Massive MIMO is a reality. What is next? Five promising research directions for antenna arrays, Digital Signal Processing, vol. 94, pp. 3–20, 2019.
10. A. Pizzo, T. L. Marzetta, and L. Sanguinetti, Spatial characterization of holographic MIMO channels, arXiv preprint arXiv:1911.04853, 2019.
11. A. Pizzo, T. L. Marzetta, and L. Sanguinetti, Degrees of freedom of holographic MIMO channels, in Proc. 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2020, pp. 1–5.

12. E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M.-S. Alouini, and R. Zhang, Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116 753–116 773, 2019.
13. Q. Wu and R. Zhang, Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 11, pp. 5394–5409, 2019.
14. K. K. Wong, K. F. Tong, Z. Chu, and Y. Zhang, A vision to smart radio environment: Surface wave communication superhighways, *arXiv preprint arXiv:2005.14082*, 2020.
15. H. Wu, G. D. Bai, S. Liu, L. Li, X. Wan, Q. Cheng, and T. J. Cui, Information theory of metasurfaces, *National Science Review*, vol. 7, no. 3, pp. 561– 571, 2020.
16. J. A. Hodge, K. V. Mishra, and A. I. Zaghoul, Reconfigurable metasurfaces for index modulation in 5G wireless communications, in *Proc. 2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)*. IEEE, 2019, pp. 1–2.
17. T. L. Marzetta, Super-directive antenna arrays: Fundamentals and new perspectives, in *Proc. 2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*. IEEE, 2019, pp. 1–4.
18. B. Yang, P. Zhang, H. Wang, and W. Hong, Electromagnetic vector antenna arraybased multi-dimensional parameter estimation for radio propagation measurement, *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 6, pp. 1608–1611, 2019.
19. A. Decurninge, I. Land, and M. Guillaud, Tensor-based modulation for unsourced massive random access, *arXiv preprint arXiv:2006.06797*, 2020.
20. J.-P. Vigneaux-ariztia, Topology of statistical systems: A cohomological approach to information theory, thesis, Max Planck Institute for Mathematics in the Sciences, Max Planck Society, 2019.
21. R. Schwartz, J. Dodge, N. A. Smith, and O. Etzioni, Green AI, *arXiv preprint arXiv:1907.10597*, 2019.

22. E. Strubell, A. Ganesh, and A. McCallum, Energy and policy considerations for deep learning in NLP, arXiv preprint arXiv:1906.02243, 2019.
23. D. Hernandez and T. B. Brown, Measuring the algorithmic efficiency of neural networks, arXiv preprint arXiv:2005.04305, 2020.
24. H. Cai, C. Gan, T. Wang, Z. Zhang, and S. Han, Once-for-all: Train one network and specialize it for efficient deployment, arXiv preprint arXiv:1908.09791, 2019.
25. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
26. ГН 3.3.5-8.6.6.1-2002. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, від 27.12.2001 року №528. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.dnaop.com/html/1709>.
27. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
28. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. – Мінбуд України. – К.: 2018
29. 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>
30. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
31. 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_праор_0_00-7_15-18_01_ua.php
32. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>
33. Про охорону праці. Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ

ДОДАТКИ

Додаток А
(Технічне завдання)

Додаток Б
(обов'язковий)

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень

Додаток В
(обов'язковий)

Інтегрована телекомунікаційна система муніципального призначення

Додаток Г
(обов'язковий)

Схема широкопasmової інфокомунікаційної мережі доступу

Додаток Д
(обов'язковий)

Структура розумної системи охорони здоров'я

Додаток Е
(обов'язковий)

Схема взаємодії БПЛА із спеціалізованими системами доступу

Додаток Є
(обов'язковий)

Структури RL та DRL у контексті бездротових стільникових мереж

Додаток Ж
(обов'язковий)

Структурна схема узагальненого бездротового каналу передавання

Додаток А
(обов'язковий)
ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав.кафедри ІКСТ ВНТУ,
докт. техн. наук, професор
В.М. Кичак
“__” _____ 2022 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи
МЕРЕЖІ ДОСТУПУ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА
МАШИННОГО НАВЧАННЯ
08-34.МКР.002.00.000 ТЗ

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

Виконавець: ст. гр. ТКС-21м
Грабчак Н.В.

Вінниця-2022

1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету від “14” 09 2022 року № 203 та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 01.09.2022 р.

Дата закінчення: 19.12.2022 р.

2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою даної магістерської кваліфікаційної роботи є дослідження способів підвищення продуктивності телекомунікаційних мереж доступу за допомогою технічних і програмних засобів штучного інтелекту та машинного навчання.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- розробка технічного завдання;
- аналіз глобального застосування мережі мобільного доступу;
- дослідження теоретичних основ штучного інтелекту та машинного навчання;
- математичне моделювання бездротових мереж великої ємності;
- особливості впровадження енергоефективних інфокомунікаційних систем.

Об'єктом дослідження є інтелектуальні радіосистеми 6G.

Предметом дослідження є технології та математичні моделі, що дозволяють забезпечити високу продуктивність радіомереж доступу 6G.

Основними завданнями роботи є:

- техніко-економічне обґрунтування доцільності даної розробки;
- аналіз глобального застосування мережі мобільного доступу;
- дослідження теоретичних основ штучного інтелекту та машинного навчання;

- математичне моделювання бездротових мереж великої ємності;
- особливості впровадження енергоефективних інфокомунікаційних систем;

- аналіз економічної ефективності проведеної розробки;
- дослідження питань безпеки життєдіяльності.

Розроблені в ході виконання роботи технічні і програмні засоби на основі технології 6G забезпечать підвищення продуктивності телекомунікаційних радіомереж.

3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Робота базується на результатах звіту з переддипломної практики «Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного навчання», який виконувався у ВНТУ у 2022/2023 н.р. Під час підготовки магістерської кваліфікаційної роботи будуть використані матеріали звіту з переддипломної практики.

Список використаних джерел розробки:

3.1 Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и применение / Бернард Скляр ; [пер. с англ]. – М.: Изд. Дом “Вильямс”, 2003. – 1104с.

3.2 D. Hernandez and T. V. Brown, Measuring the algorithmic efficiency of neural networks, arXiv preprint arXiv:2005.04305, 2020.

3.3 H. Cai, C. Gan, T. Wang, Z. Zhang, and S. Han, Once-for-all: Train one network and specialize it for efficient deployment, arXiv preprint arXiv:1908.09791, 2019.

3.4 A. Pizzo, T. L. Marzetta, and L. Sanguinetti, Degrees of freedom of holographic MIMO channels, in Proc. 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2020, pp. 1–5.

3.5 K. K. Wong, K. F. Tong, Z. Chu, and Y. Zhang, A vision to smart radio environment: Surface wave communication superhighways, arXiv preprint arXiv: 2005.14082, 2020.

3.6 G. Bortnyk, M. Vasylykivskyi and V. Kychak, "High-Processing Method of Spectral Analysis Wide-Signals," 2019 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/UkrMiCo47782.2019.9165507.

3.7 Васильківський М. В. Оцінювання енергетичних характеристик радіоканалів міліметрового діапазону [Текст] / М. В. Васильківський, О. І. Мельничук, О. В. Стальченко // Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», Вінниця, 14-16 листопада 2019 р. – 2019. – С. 80–81.

3.8 Бортник, Г. Г. Методи та засоби цифрового оброблення радіосигналів для систем безпеки та моніторингу : монографія / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2020. –126 с.

3.9 Бортник Г. Г. Метод розширення динамічного діапазону аналого-цифрових трактів засобів цифрового оброблення радіосигналів [Текст] / Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, Р. М. Вітер // Вісник Хмельницького національного університету. Серія "Технічні науки". – 2020. – № 1 (281). – С. 48-51.

3.10 Васильківський М. В. Оптимізація параметрів інфокомунікаційних мереж п'ятого покоління [Текст] / М. В. Васильківський, С. О. Болдинюк // Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)», Вінниця, 14-16 листопада 2019 р. – 2019. – С. 68–69.

3.11 Кичак В. М. Технології надпровідних приймачів терагерцового діапазону [Текст] / В. М. Кичак, М. В. Васильківський // Матеріали

тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції "Перспективи телекомунікацій" , 15—19 квітня 2019 р. — Київ. — Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". - С. 222-224.

3.12 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.

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

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

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

3.16 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-21м Грабчак Н.В.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Пропонується виконати дослідження способів підвищення продуктивності сегментів інфокомунікаційних мереж на основі технологій

6G з використанням штучного інтелекту для підвищення ефективності роботи апаратно-програмного телекомунікаційного обладнання.

Технічні вимоги, яким повинна відповідати розробка, наступні:

- точність позиціонування в радіомережі – 1,5 см;
- технологія побудови мобільної мережі – 6G;
- швидкість передавання відеоданих у виділеному каналі мережі – 10 Гбіт/с;
- значення затримки передавання даних в мережі – 1 мс;
- значення надійності роботи засобів передавання даних – 99,9999 %;
- метод оптимізації процесу обробки даних та обслуговування каналів – машинне навчання;
- засіб підвищення продуктивності комутаційного обладнання мережі – штучний інтелект;
- швидкість передавання даних в груповому каналі мережі з рухомим об'єктом – 1 Гбіт/с;
- швидкість передавання даних в каналі доступу до мережі – 50 Мбіт/с.

При розробці обладнання мобільних мереж 6G слід максимально використовувати стандартні та уніфіковані деталі.

6 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати	Звітна документація
		початок	закінчення		
1.	Розробка технічного завдання (ТЗ)	01.09.2022р.	12.09.2022р.	Розроблене ТЗ	Додаток А
2.	Аналіз глобального застосування мереж мобільного доступу	13.09.2022р.	19.09.2022р.	Проведений аналіз технологій	Вступ. Розділ 1.
3.	Дослідження теоретичних основ штучного інтелекту та машинного навчання	20.09.2022р.	07.10.2022р.	Проведений аналіз методів	Розділ 2

4.	Математичне моделювання бездротових мереж великої ємності	08.10.2022р.	28.10.2022р.	Математичні моделі	Розділ 3
5.	Особливості впровадження енергоефективних інфокомунікаційних систем	29.10.2022р.	18.11.2022р.	Архітектури та алгоритми роботи	Розділ 4
6.	Аналіз економічної ефективності	19.11.2022р.	25.11.2022р.	Економічна частина МКР	Розділ 5
7.	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	26.11.2022р.	02.12.2022р.	Частина ОП та БНС	Розділ 6
8.	Оформлення пояснювальної записки (ПЗ) та графічної частини	03.12.2022р.	09.12.2022р.	Оформлена документація	ПЗ та графічна частина
9.	Нормоконтроль, попередній захист, опонування МКР	12.12. 2022р.	14.12.2022р.	Позитивні відзиви	Відгуки
10.	Захист МКР ЕК		19.12.2022р.	Позитивний захист	Протокол ЕК

7 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОРЯДОК РЕАЛІЗАЦІЇ МКР

В результаті виконання роботи будуть розроблені:

- інтегрована телекомунікаційна система муніципального призначення;
- схема широкосмугової інфокомунікаційної мережі доступу;
- структура розумної системи охорони здоров'я;
- схема взаємодії БПЛА із спеціалізованими системами доступу;
- структури RL та DRL у контексті бездротових стільникових мереж;
- структурна схема узагальненого бездротового каналу передавання;
- економічна частина МКР;
- розділ ОП та БНС;
- рекомендації щодо подальшого використання телекомунікаційних засобів на основі штучного інтелекту.

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

- Регіональний Центр експлуатації телекомунікаційної мережі України шляхом впровадження інтелектуальної радіосистеми 6G;

- ПАТ “Укртелеком” шляхом впровадження технології та математичної моделі, що дозволяють забезпечити високу продуктивність радіомереж доступу 6G.

Очікуваний техніко-економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень очікується підвищення продуктивності сегментів телекомунікаційних мереж доступу.

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:

- інтегровану телекомунікаційну систему муніципального призначення;
- схему широкопasmової інфокомунікаційної мережі доступу;
- структуру розумної системи охорони здоров'я;

- схему взаємодії БПЛА із спеціалізованими системами доступу;
- структури RL та DRL у контексті бездротових стільникових мереж;
- структурну схему узагальненого бездротового каналу передавання;
- економічну частину та розділ БЖД і ЦЗ;
- рекомендації щодо подальшого використання телекомунікаційних засобів на основі штучного інтелекту.

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.

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

а роботи: Мережі доступу на основі штучного інтелекту та машинного
знання

роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

зділ кафедра інфокомунікаційних систем і технологій, факультет
змаційних електронних систем
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

інальність 97,83 % Схожість 2,17 %

з 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 кає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. у направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування ровісних запозичень.

відповідальна за перевірку


(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

йомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо
ги.

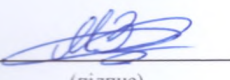
р роботи


(підпис)

Грабчак Н.В.

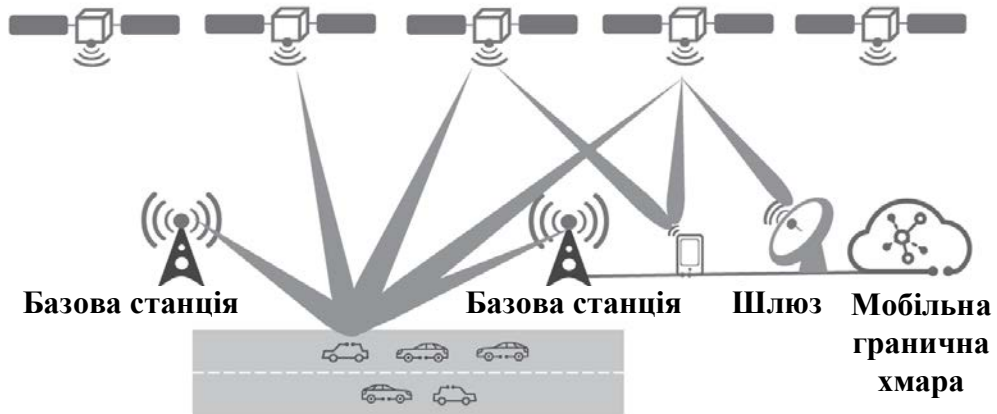
(прізвище, ініціали)

зник роботи

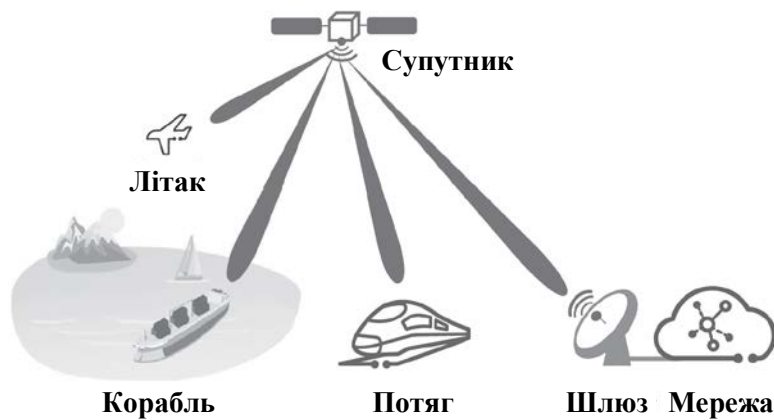

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)



					08-34.МКР.002.00.001 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Інтегрована телекомунікаційна система муніципального призначення	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Грабчак Н.В.					1	1
Перевір.		Васильківський М.В.				ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Реценз.								
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						



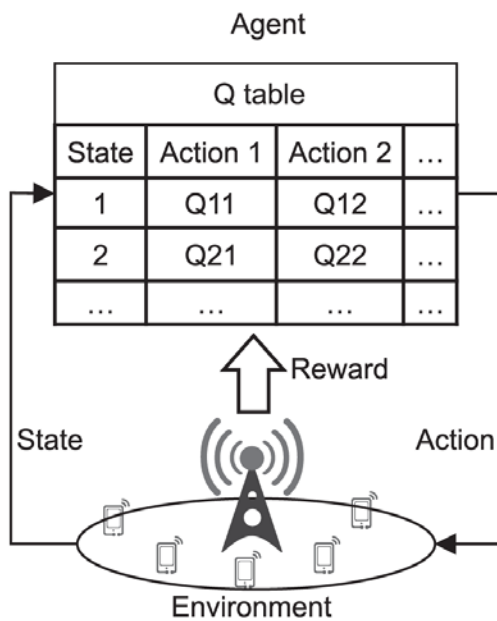
					08-34.МКР.002.00.002 Е8					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Схема широкосмугової інфокомунікаційної мережі доступу					
Розроб.		Грабчак Н.В.						Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.							1	1
Реценз.								ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.								
Затверд.		Кичак В.М.								



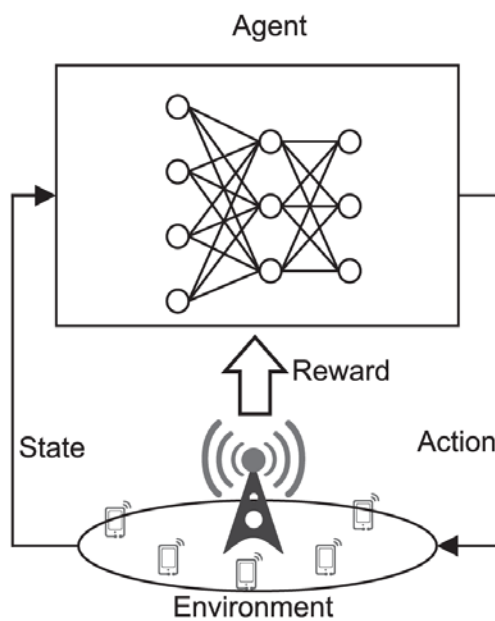
					08-34.МКР.002.00.003 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Структура розумної системи охорони здоров'я	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Грабчак Н.В.					1	1
Перевір.		Васильківський М.В.				ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Реценз.								
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						



					08-34.МКР.002.00.004 Е8					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Схема взаємодії БПЛА із спеціалізованими системами доступу			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Грабчак Н.В.							1	1
Перевір.		Васильківський М.В.								
Реценз.										
Н. Контр.		Васильківський М.В.								
Затверд.		Кичак В.М.			ВНТУ, гр. ТКС-21м					

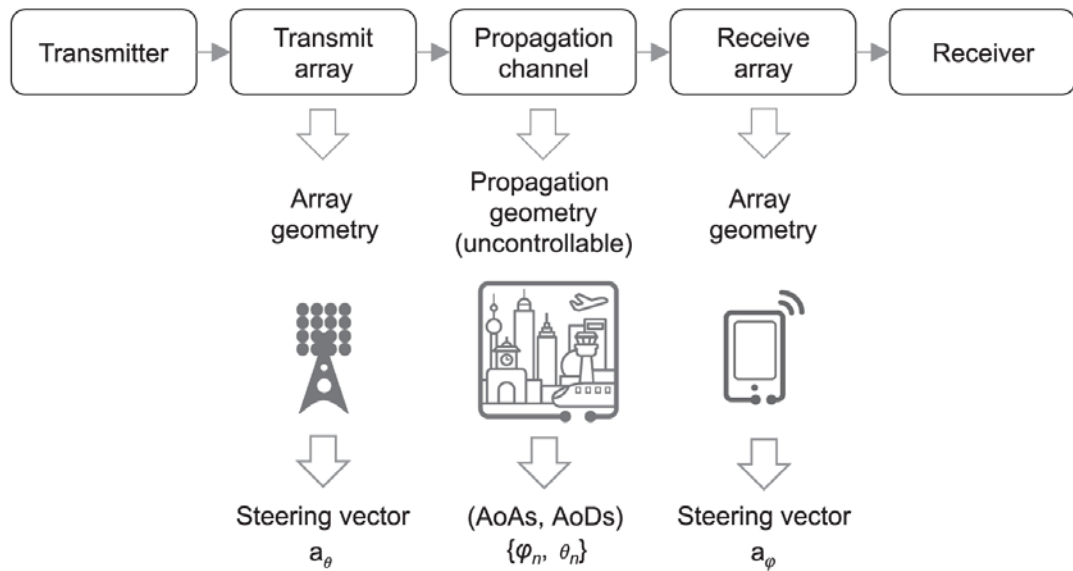


(a) Reinforcement learning



(b) Deep reinforcement learning

					08-34.МКР.002.00.005 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Структури RL та DRL у контексті бездротових стільникових мереж	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Грабчак Н.В.					1	1
Перевір.		Васильківський М.В.						
Реценз.								
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.			ВНТУ, гр. ТКС-21м			



					08-34.МКР.002.00.006 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Грабчак Н.В.			Структурна схема узагальненого бездротового каналу передавання	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.						ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						