

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Апаратне забезпечення мобільних систем 6G»

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

 Климчук Б.С.

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

 д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 16 » 12 2022 р.

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

“14” 09 2022 року



ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Климчуку Богдану Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G»

керівник 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


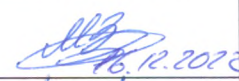
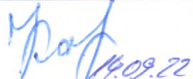

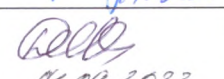
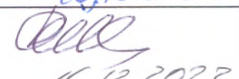
2. Строк подання студентом роботи 12 грудня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи метод мультиплексування каналів в радіосистемі - OAM-MIMO; технологія побудови мобільної системи – 6G; швидкість передавання даних радіосистеми – 100 Гбіт/с; довжина радіолінії передавання – 10 м; носійна радіочастота – 300 ГГц; рівень потужності передавача – 0 дБм; чутливість приймача - -60 дБм; нормований коефіцієнт затухання лінії передавання – 10 дБ/км; коефіцієнт підсилення антенного обладнання – 30 дБ; коефіцієнт шуму – 15 дБ; коефіцієнт підсилення підсилювача – 15 дБ; формат модуляції - 32QAM; тип коду для каналу керування – полярний код; тип коду для каналу передавання даних – LDPC.

4. Зміст текстової частини: аналіз апаратного забезпечення радіосистем та мереж; сценарії використання нового телекомунікаційного обладнання; сучасні системи передавання ТГц-діапазону; інноваційні телекомунікаційні пристрої для систем 6G.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) телекомунікаційні пристрої наступних поколінь; схема віртуального телекомунікаційного пристрою; ключові показники ефективності використання каналів в інфокомунікаційних системах передавання; схема кодування для систем передавання даних із швидкістю Тбіт/с; схеми кодування SSCC та JSCC; схеми мережного кодування.

6. Консультанти розділів роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Васильківський М.В., доцент кафедри ІКСТ	 14.09.2022	 16.12.2022
Аналіз економічної ефективності розробки	Кавецький В.В., доцент кафедри ЕТІВМ	 14.09.22	 16.12.2022
Охорона праці та безпека в ІРС	Демблерка С.В. професор кафедри ІБХДІЗБ	 14.09.2022	 16.12.2022

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2022 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка технічного завдання	12.09.2022р.	
2.	Аналіз апаратного забезпечення радіосистем та мереж	19.09.2022р.	
3.	Сценарії використання нового телекомунікаційного обладнання	07.10.2022р.	
4.	Сучасні системи передавання ТГц-діапазону	28.10.2022р.	
5.	Інноваційні телекомунікаційні пристрої для систем 6G	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)

Климчук Б.С.

Керівник роботи


 (підпис)

Васильківський М.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.391

Климчук Б. С. Апаратне забезпечення мобільних систем 6G – магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – Телекомунікаційні системи та мережі – Вінниця: ВНТУ 2022 р. 147 – стор., 32 – рис., 35 – табл., 70 – бібл. – українською мовою.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення продуктивності телекомунікаційних радіосистем за допомогою технічних і програмних засобів побудованих на основі технології 6G.

Розглянуто технології побудови телекомунікаційних систем та мереж на основі технології 6G, які зможуть забезпечити доступ до нових функціональних можливостей та інформаційних послуг з використанням інноваційних бездротових технологій та методів штучного інтелекту. Робота систем зв'язку та сканування в нових високочастотних діапазонах на основі нових матеріалів та антен базується на застосуванні кремнієвої фотоніки, фотонних кристалів, гетерогенних, реконфігурованих, фотоелектричних та плазмонних матеріалів. Здійснено дослідження нових обчислювальних технологій, таких як обчислення на основі структур штучного інтелекту та квантові обчислення. Розглянуто ключові показники ефективності майбутніх телекомунікаційних кінцевих пристроїв у складі інфокомунікаційних радіомереж 6G та визначено їх функціональні можливості.

Ключові слова: штучний інтелект, телекомунікаційний пристрій, інфокомунікаційна мережа, каналне кодування, безпроводний зв'язок, машинне навчання, віртуальний пристрій, ключовий показник ефективності.

ANNOTATION

UDC 621.391

Klymchuk B. S. Hardware support of mobile systems 6G - master's qualification thesis on specialty 172 - Telecommunications and radio engineering, educational program - Telecommunications systems and networks - Vinnytsia: VNTU 2022. 147 - p., 32 - fig., 35 - tab. , 70 - bibl. - in the Ukrainian language.

The goal of the master's qualification work is to increase the productivity of telecommunication radio systems with the help of technical and software tools built on the basis of 6G technology.

Technologies for building telecommunication systems and networks based on 6G technology, which will be able to provide access to new functionality and information services using innovative wireless technologies and artificial intelligence methods, are considered. The operation of communication and scanning systems in new high-frequency ranges based on new materials and antennas is based on the application of silicon photonics, photonic crystals, heterogeneous, reconfigurable, photoelectric and plasmonic materials. New computing technologies, such as computing based on artificial intelligence structures and quantum computing, have been researched. The key performance indicators of future telecommunication terminal devices as part of 6G information communication radio networks are considered and their functional capabilities are determined.

Keywords: artificial intelligence, telecommunication device, information communication network, channel coding, wireless communication, machine learning, virtual device, key performance indicator.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	11
1 АНАЛІЗ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАДІОСИСТЕМ ТА МЕРЕЖ....	15
1.1 Розвиток кремнієвої платформи	15
1.2 Гетерогенна платформа на матеріалах типу III-V	16
1.3 Реконфігурований матеріал.....	17
1.4 Фотонний кристал	18
1.5 Фотоелектричні матеріали та фотодетектор	19
1.6 Плазмонний матеріал.....	20
1.7 Висновки до розділу 1	23
2 СЦЕНАРІЇ ВИКОРИСТАННЯ НОВОГО ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ	24
2.1 Антена з фотопровідною лінзою	24
2.2 Антенні решітки	25
2.3 Метаповерхні	27
2.4 Нанофотодетектори.....	29
2.5 Антена на кристалі та антена в корпусі	30
2.6 Орбітальний кутовий момент	31
2.7 Висновки до розділу 2	32
3 СУЧАСНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ТГц-ДІАПАЗОНУ	33
3.1 Компоненти ТГц-систем.....	33
3.1.1 Електронний підхід.....	34
3.1.2 Гібридний та фотонний підходи.....	40
3.2 Системи ТГц-діапазону	42
3.2.1 Терагерцові системи зв'язку.....	43
3.2.2 ТГц-візуалізація та сенсорні системи	45
3.3 Особливості впровадження систем бездротового зв'язку.....	47
3.4 Висновки до розділу 3	48

	3
4 ІННОВАЦІЙНІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ СИСТЕМ 6G	50
4.1 Мобільні пристрої майбутнього	50
4.2 Інтерфейс пристроїв майбутнього	58
4.3 Нові мобільні пристрої	62
4.4 Обчислювальна техніка після закону Мура	63
4.5 Нейроморфні розрахунки	66
4.6 Квантові розрахунки	68
4.7 Нові обчислювальні архітектури	71
4.8 Висновки до розділу 4	72
5 ПРОДУКТИВНЕ КАНАЛЬНЕ КОДУВАННЯ РАДІОСИГНАЛІВ В МЕРЕЖАХ 6G	74
5.1 Обґрунтування необхідності застосування нового кодування.....	74
5.2 Схеми канального кодування.....	76
5.3 Цільові KPI канального кодування 6G.....	77
5.4 Принципи проектування канального кодування 6G.....	79
5.4.1 Єдине та гнучке канальне кодування.....	79
5.4.2 Кодування для високої пропускної здатності	81
5.4.3 Короткі коди	83
5.4.4 Кодування для критично важливих програм	84
5.5 Спільне кодування джерела та каналу	86
5.6 Спільне кодування джерел та каналів на основі машинного навчання	88
5.7 Принципи проектування JSCC для 6G.....	91
5.8 Мережеве кодування на фізичному рівні	92
5.9 Сценарії застосування мережевого кодування на фізичному рівні	93
5.10 Принципи проектування мережевого кодування 6G.....	96
5.11 Висновки до розділу 5	97
6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	98
6.1 Оцінювання наукового ефекту.....	98
6.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	102
6.2.1 Витрати на оплату праці.....	102

6.2.2 Відрахування на соціальні заходи	106
6.2.3 Сировина та матеріали.....	106
6.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	108
6.2.5 Спецстаткування для наукових (експериментальних) робіт	109
6.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт	110
6.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень	111
6.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей	112
6.2.9 Службові відрядження.....	113
6.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	114
6.2.11 Інші витрати.....	115
6.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати.....	115
6.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	117
6.4 Висновок до розділу 6.....	118
7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	119
7.1 Технічні рішення з безпечного виконання робіт	119
7.1.1 Технічні рішення з організації робочого місця під час проектування	119
7.1.2 Електробезпека приміщення.....	120
7.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	121
7.2.1 Мікроклімат	121
7.2.2 Склад повітря робочої зони.....	122
7.2.3 Виробниче освітлення.....	123
7.2.4 Виробниче освітлення.....	124
7.2.5 Виробничий шум.....	125
7.2.6 Виробничі випромінювання.....	125
7.2.7 Психофізіологічні фактори	126
7.3 Організація оповіщення населення	127
7.4 Висновки до розділу 7	128
ВИСНОВКИ.....	129

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	131
ДОДАТКИ.....	139
Додаток А Технічне завдання	140
Додаток Б Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	141
Додаток В Телекомунікаційні пристрої наступних поколінь.....	142
Додаток Г Схема віртуального телекомунікаційного пристрою	143
Додаток Д Ключові показники ефективності використання каналів в інфокомунікаційних системах передавання	144
Додаток Е Схема кодування для систем передавання даних із швидкістю Тбіт/с	145
Додаток Є Схеми кодування SSCC та JSCC.....	146
Додаток Ж Схеми мережного кодування	147

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

3GPP – Партнерський проект третього покоління
5G – 5-е покоління мобільного зв'язку
5G-ACIA – Альянс 5G для підключених галузей та автоматизації
ACLR – Коефіцієнт впливу по сусідньому каналу
ADC – Аналого-цифровий перетворювач
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
BER – Коефіцієнт бітових помилок
BICM – Кодована модуляція з чергуванням бітів
BLER – Коефіцієнт блокових помилок
BPSK – Двійкова фазова маніпуляція
CA – Агрегація несучих частот
CDMA – Множинний доступ з кодовим поділом каналів
CEM – Моделювання задач електромагнетизму
CJT – Когерентна спільна передача
CN – Базова мережа, опорна мережа
CNN – Згорткова нейронна мережа
CoMP – Скоординована багатоточкова передача
CP – Циклічний префікс
CRS – Опорний сигнал стільника
CT – Комп'ютерна томографія
CU – Блок керування

D2D – Міжприладава взаємодія, зв'язок пристрій-пристрій
DAC – Цифроаналоговий перетворювач
DBN – Динамічна байєсовська мережа
DC – Подвійне підключення
DFT – Дискретне перетворення Фур'є
DLT – Технологія розподіленого реєстру (блокчейн)
DNN – Глибока нейромережа
DRL – Глибоке навчання з підкріпленням
DSS – Динамічне спільне використання спектру
EIT – Теорія електромагнітної інформації
ELAA – Антенна решітка з екстремально великою апертурою
eMBB – Покращений мобільний широкосмуговий доступ
EVM – Амплітуда вектора помилки
FDD – Дуплексний зв'язок із частотним поділом каналів
FDMA – Множинний доступ із частотним поділом
FEC – Пряма корекція помилок
FFT – Швидке перетворення Фур'є
GFDM – Узагальнене мультиплексування з частотним поділом каналів
GPU – Графічний процесор
GSMA – Асоціація глобальної системи мобільного зв'язку
IB – Вузьке місце інформаційного потоку
ICI – Завади між несучими
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
IRS – Інтелектуальна відбивна поверхня

ISAC – Інтегроване сканування та зв'язок
JSCC – Спільне кодування джерел та каналів
ISLR – Інтегроване відношення бічних пелюсток
KPI – Ключовий показник ефективності
LDPC – Код низької щільності з контролем парності
LED – Світлодіод
LOS – Пряма видимість
M2M – Міжмашинна взаємодія, міжмашинні комунікації
MA – Множинний доступ
MAC – Керування доступом до середовища
MARL – Багатоагентне (розподілене) навчання з підкріпленням
MCS – Схема модуляції та кодування
MEC – Мобільні граничні обчислення
MIMO – Багатоканальний вхід, багатоканальний вихід
ML – Машинне навчання
MMSE – Мінімальна середньоквадратична помилка
mMTC – Потіковий зв'язок машинного типу
mm Wave – Міліметрові хвилі
MNO – Оператор мобільної мережі
MUSA – Багатокористувальний спільний доступ
MUSIC – Класифікація групових сигналів
MUST – Багатокористувальна передача з накладенням
NB-IoT – Широкосмуговий інтернет речей
NCJT – Некогерентна спільна передача
NDF – Вузькосмугове цифрове поширення (інформації)
NEP – Еквівалентна потужність шуму
NFI – Візуалізація в ближньому полі
NFV – Віртуалізація мережевих функцій
NOMA – Неортогональний множинний доступ
NTN – Неназемна мережа

OA&M – Експлуатація, керування та технічне обслуговування

OFDM – Ортогональне мультиплексування з частотним поділом

OFDMA – Множинний доступ з ортогональним частотним поділом

OMA – Ортогональний множинний доступ

OMP – Ортогональна апроксимація з переслідуванням

OOBE – Позасмугове випромінювання

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

OWC – Оптичний бездротовий зв'язок

P2P – Пряма комунікація, наскрізна передача

PA – Підсилювач потужності

PAPR – Відношення пікового рівня потужності сигналу до середнього

PAR – Частота надходження пакетів

PCE – Ефективність фотоперетворення

PDMA – Множинний доступ з поділом за шаблоном

PDR – Коефіцієнт відкидання пакетів

PDSCH – Фізичний ущільнений канал низхідної лінії зв'язку

PHY – Фізичний рівень

PLE – Ступінь втрат у тракті

PNC – Кодування на рівні фізичної мережі

PPD – Кількість пікселів на кутовий градус

PQC – Постквантова криптографія

QAM – Квадратурна амплітудна модуляція

QD – Квантова точка

QoS – Якість обслуговування

RACH – Канал довільного доступу

RAN – Мережа радіодоступу

RF – Радіочастота

RIS – Реконфігурована інтелектуальна поверхня

RL – Навчання з підкріпленням

RNN – Рекурентна нейромережа

RRC – Протокол керування радіоресурсами
RS – Опорний сигнал
RSMA – Множинний доступ з розширенням ресурсів
RSRP – Потужність еталонного сигналу, що приймається
RTT – Тривалість прийому-передачі
SCL – Множинний доступ з розрідженим кодом
SDMA – Множинний доступ з просторовим поділом
SDN – Програмно-конфігурована мережа
SEEG – Стереоелектроенцефалографія
SeGW – Шлюз безпеки
SIC – Послідовне придушення завад
SNR – Відношення сигнал-шум
SP-OFDM – OFDM з попереднім спектральним кодуванням
SSB – Блоки сигналу синхронізації
STBC – Просторово-часове блочне кодування
TDD – Дуплексний зв'язок з часовим поділом
TDL-C – Канал на основі лінії затримки з відводами
TDMA – Множинний доступ із часовим поділом каналів
TDS – Спектроскопія в часовій області
THz – Терагерц, ТГц
TN – Транспортна мережа
UAV – Безпілотний літальний апарат
UCNC – Орієнтація на користувача без комірки
UDR – Репозиторій даних користувача
UFMC – Універсальна фільтрація з кількома несучими
URLLC – Наднадійна система зв'язку з малою затримкою
V2I – Транспортний засіб - інфраструктура
V2V – Зв'язок транспортний засіб – транспортний засіб
VR – Віртуальна реальність
W-OFDM – Віконне OFDM

ВСТУП

Актуальність теми. Стрімкий розвиток цифрового зв'язку протягом багатьох років можна охарактеризувати як наслідок значного прогресу в напівпровідникових технологіях. Оскільки 6G більше не є питанням далекого майбутнього, технології отримання нових матеріалів сприятимуть якнайшвидшому руху в цьому напрямку. При наближенні до більш високочастотної частини спектру у рамках ТГц-діапазону в значній мірі починають використовуватись сучасні фотонні матеріали. Зокрема фотонні кристали дозволяють виготовляти оптичні компоненти з низькими втратами. Крім того, фотоелектричні матеріали перетворюють світло на електричні сигнали і дозволяють фотодетекторам виконувати ключові функції фотонної системи ТГц-діапазону. І останнє, але не менш важливе: плазмонні матеріали підтримують поверхневі плаزمони, які здатні збільшувати взаємодію між світлом та матеріалами. Це особливо корисно, коли нам потрібно покращити роботу фотонної/оптоелектронної системи ТГц-діапазону.

Аналіз останніх досліджень. Звичайні антени розраховані на підключення до радіочастотних систем через коаксіальні кабелі або мікросмушкові лінії. Антени ТГц-діапазону радикально відрізняються від них, тому що втрати в лінії передачі на терагерцових частотах занадто великі. У нижчому діапазоні частот (100-500 ГГц) були продемонстровані інтегральні схеми на основі кремнію з інтегрованою антеною на кристалі та антеною в корпусі [1, 2]. За межами 500 ГГц можна використовувати комбіновану технологію III-V/кремній, що дозволяє використовувати звичайні антени до 1 ТГц.

З іншого боку, оскільки ТГц-система може бути реалізована на фотонній платформі, при цьому терагерцові хвилі можна генерувати, пропускаючи фотострум через фотопровідну антену (photoconductive antenna, PCA) або електрооптичний кристал. При освітленні лазерними променями на певних частотах в деяких напівпровідникових підкладках, наприклад InP і GaAs, може

генеруватися струм фотопровідності, який в подальшому може випромінюватися у простір у вигляді ТГц-хвилі за допомогою антени.

Наноподетектори мають схожий принцип роботи, з тією різницею, що вони вимірюють фотострум, що генерується, за допомогою схеми, призначеної для візуалізації/зчитування. Завдяки невеликому розміру і низькому енергоспоживанню наноподетектори демонструють величезний потенціал застосування в мобільних засобах і пристроях.

Завдяки розсіювачам з ретельно вивіреними формами і відстанями між ними інтелектуальні поверхні, такі як решітки, що відбивають і передають, можуть служити плоскими «відбивачами» або «лінзами». У такі поверхні зазвичай вбудовують компоненти, що реконфігуруються, щоб забезпечити гнучке підстроювання до різних рівнів освітленості радіохвилями. Метаповерхні підтримують розумну функціональність, забезпечуючи задану користувачем реакцію на певний рівень освітленості. У майбутньому для програмування цієї реакції можна буде використовувати цифровий контролер і такі інтелектуальні поверхні гарантовано забезпечать нам компактні, високоефективні та недорогі системи зв'язку в ТГц-діапазоні.

У системі масивного MIMO 5G з моменту її впровадження у 2010 році було досягнуто значного прогресу [3]. Але оскільки слідом неминуче на сцену вийде 6G, вже зараз потрібно шукати нові дослідницькі перспективи підвищення продуктивності MIMO. У цьому для досягнення додаткової глибини різкості пропонується використовувати орбітальний кутовий момент (orbital angular momentum, OAM), кінцевою метою якого є поліпшення характеристик каналу. Також повідомлялося, що використання кількох спільних структур бездротового зв'язку OAM та масивних MIMO дозволяє отримати мультиплікативне підсилення ефективності спектру [4, 5].

Нещодавні розробки в галузі напівпровідникової технології дозволили подолати «заборонену зону» у ТГц-діапазоні (викликану відсутністю апаратних засобів для роботи в ТГц-діапазоні) та стимулювали розвиток різних застосувань терагерцових частот. Що стосується спектру, його терагерцова область

знаходиться між міліметровим діапазоном радіохвиль та інфрачервоним світлом. Сигнали ТГц-діапазону можуть проникати через діелектричні матеріали на різну глибину, відкриваючи нові способи отримання зображень. Завдяки ефектам теорії дифракційної межі роздільна здатність просторового зображення в ТГц-спектрі буде набагато вищою порівняно з його аналогом у міліметровому діапазоні. ТГц-випромінювання також неіонізуюче, оскільки його частота нижча, ніж в УФ-діапазоні, а це означає, що він має широкі перспективи застосування в біомедичних додатках. Крім того, різні матеріали демонструють унікальні відгуки в діапазоні 0,5–3 ТГц, що дозволяє використовувати такі відгуки як спектральні «відбитки» для виявлення та визначення характеристик матеріалу.

Зростання попиту на вищі швидкості передачі і меншу затримку означає, що підвищення носійної частоти і ширини смуги пропускання стають дедалі важливішими під час розробки систем зв'язку. Дослідження архітектури систем терагерцового зв'язку базується на двох різних підходах побудови апаратного забезпечення: електронний, де радіочастоти множаться до ТГц; та фотонний, де оптичні частоти діляться до ТГц. Слід зазначити той факт, що більшість цих систем розробляються в основному для зв'язку на малих відстанях усередині приміщень, частково через високе атмосферне згасання в ТГц-діапазоні. Однак цього можна певною мірою уникнути, вибравши «вікно частот», в якому втрати в атмосфері низькі, наприклад 140, 220 і 300 ГГц.

Мета і завдання роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження способів підвищення продуктивності телекомунікаційних радіосистем за допомогою технічних і програмних засобів побудованих на основі технології 6G.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

1. Аналіз апаратного забезпечення радіосистем та мереж;
2. Дослідження особливостей застосування нового телекомунікаційного обладнання;
3. Дослідження сучасних систем передавання ТГц-діапазону;

4. Особливості створення інноваційних телекомунікаційних пристроїв для систем 6G.

5. Дослідження методу продуктивного каналного кодування радіосигналів в мережах 6G.

Об'єктом дослідження є пристрої та засоби мобільних систем 6G.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та математичні моделі, що дозволяють забезпечити високу продуктивність мобільних систем 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.

Новизна одержаних результатів: визначено способи підвищення продуктивності телекомунікаційних радіосистем за допомогою інноваційних технічних засобів у складі інфокомунікаційних мереж 6G зокрема: здійснено аналіз апаратного забезпечення радіотехнічного обладнання; виконано дослідження сучасних інформаційних систем ТГц-діапазону; визначено особливості створення інноваційних телекомунікаційних пристроїв для систем 6G; виконано дослідження ефективного каналного кодування радіосигналів в мережах 6G.

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-технічної конференції.

1 АНАЛІЗ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАДІОСИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

1.1 Розвиток кремнієвої платформи

До існуючої зрілої кремнієвої платформи, яка має низьку вартість, високий вихід, невелику геометрію і низьке енергоспоживання, додаються нові технологічні рішення, що дозволяють реалізувати нові можливості. Хорошим прикладом є процес розробки SiGe-BiCMOS, який розпочався у 1990-х роках.

Сьогодні платформа SiGe-BiCMOS успішно працює у багатьох застосуваннях, таких як формування зображень, спектроскопія та обмін даними, які неможливо реалізувати на стандартній платформі CMOS.

Для ефективної побудови зображень об'єктів у ТГц-діапазоні потрібно швидко отримання даних, і ми можемо досягти цього, використовуючи антенні решітки у фокальній площині. Для цього були продемонстровані багатопіксельні ґрати з використанням технології SiGe [1]. Також було продемонстровано компактну систему ТГц-спектроскопії з використанням технології SiGe BiCMOS до 1 ТГц [2]. Крім того, для отримання зображень надвисокої роздільної здатності (зображень за межами дифракційної межі) в [3] був розроблений датчик зображення ближнього поля з використанням процесу SiGe BiCMOS, і було досягнуто просторової роздільної здатності 10 мікрометрів. Також було продемонстровано застосування технологій CMOS та SiGe у багатьох схемах зв'язку ТГц-діапазону.

Розвиток кремнієвої платформи послужило поштовхом до розвитку фотонних систем [4, 5]. Напевно варто згадати прогрес, досягнутий кремнієвою фотонікою за останні кілька десятиліть. Це стало можливим завдяки оптимізації стандартного процесу CMOS, наприклад, додаванню кроків нарощування Ge, щоб забезпечити інтеграцію фотодетектора та модулятора крім стандартних технологічних кроків CMOS. Для інтеграції фотонних та електронних структур було запропоновано та продемонстровано як плоску, так і багат шарову архітектуру. Крім того, були розроблені різні оптичні між'єднання, що

забезпечують низькі втрати та ефективне використання простору. Багатошарова інтеграція краще порівняно зі складними планарними хвилеводами, оскільки вона дозволяє більш ефективно використовувати простір і знижує складність. З цих причин вона є перспективною перспективною архітектурою для багатьох оптоелектронних додатків.

1.2 Гетерогенна платформа на матеріалах типу III-V

Електронні та фотонні матеріали зумовили прогресивний розвиток у різних галузях. У міру швидкого розвитку виробничих процесів зростає і кількість застосувань сучасних матеріалів. В останні десятиліття ми підвищували складність та продуктивність кремнієвих пристроїв відповідно до закону Мура. Проте кремній має фундаментальні обмеження використання фотонної електроніки через його непрямої забороненої зони. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано напівпровідники типу III-V із прямою забороненою зоною. Деякі матеріали III-V, наприклад фосфід індія (InP) та арсенід галію (GaAs), були випробувані у терагерцовому діапазоні частот (> 1 ТГц) у складі фотонних інтегральних схем та показали задовільні результати. На жаль, це дорога технологія, і тому вона не набула широкого поширення на ринку. Проте інтерес до фотоніки не зник, і сьогодні вона знайшла застосування у технології сканування навколишнього середовища, радарів та зв'язку.

Фотонні інтегральні схеми можуть отримати суттєвий вигаш від використання гетерогенних платформ. Зокрема, з'єднання різних шарів матеріалів III-V на одній матриці дозволяє оптимізувати будову кожного компонента. Іншими словами, для кожного компонента можна вибрати свої оптимальні матеріали та конструкцію, а потім інтегрувати їх на одному кремнієвому кристалі. При цьому досліджено гетерогенну систему «мережа на кристалі», що включає повний набір компонентів фотонного зв'язку, зокрема лазери, модулятори і підсилювачі різних стеках шарів III-V.

Використовуючи підхід гетерогенної інтеграції, ми також можемо додати в систему на кристалі інші матеріали, що не належать до групи III–V. Було показано, що кремнієвий кристал можна інтегрувати невзаємні магнітні матеріали, такі як Ce:YIG [8], тим самим формуючи у фотонній інтегральній схемі складніші блоки, такі як ізолятори і циркулятори.

1.3 Реконфігурований матеріал

Використовуючи матеріали з властивостями, що електрично змінюються, можна створювати пристрої з підвищеною функціональністю, меншими розмірами і меншими витратами. По суті, різні матеріали, що налаштовуються, використовують для гнучкого і динамічного керування властивостями системи. Наприклад, наніспи матеріали, що реконфігуруються, на інтелектуальну поверхню і з'єднавши її з цифровою схемою керування, можна реалізувати програмовану RIS.

Графен – це двовимірний вуглецевий матеріал, який може підтримувати поширення поверхневих плазмон-поляритонів (surface plasmon polaritons, SPP). Залежно від величини прикладеної напруги графен може демонструвати різні рівні провідності і, отже, керувана електромагнітна поведінка. На цей час були запропоновані різні графенові пристрої, що використовують цю властивість змінної провідності, включаючи перемикачі, фазообертачі та антени. Тому було здійснено вичерпний огляд потенційних застосувань графену у ТГц-комунікаціях, біологічному зондуванні та багатьох інших областях. В результаті вихначено, що передавальна графенова антена може керувати променем. У реконфігурованих графенових відбивних ґратах [12] шляхом докладання різних напруг зсуву були досягнуті фази відображення, що змінюються. Також розглянуто графеновий перемикач, який працює шляхом зміщення сегментів графенових секцій під впливом різної напруги. Стандартні недорогі та некеровані реактори для осадження графену коштують приблизно 1 млн. доларів США.

Рідкі кристали виявляють властивості як рідини, і кристала. Нематичний рідкий кристал може змінювати властивості падаючої хвилі, коли вона проходить через рідину, і цей ефект залежить від інтенсивності прикладених електричних полів. Нематичний рідкий кристал можна ефективно використовувати в електронних системах, що реконфігуруються. Так, у роботах [14, 15] запропонували реконфігуровані відбивні ґрати і метаповерхня з використанням рідкого кристала для керування променем. У статті [16] представлені фазообертачі і фазовані антенні ґрати на основі рідких кристалів. Там же було обговорено можливість комерціалізації подібних розробок.

Матеріали з фазовим переходом (phase change material, PCM) реконфігурують шляхом нагрівання та охолодження, в результаті чого відбувається перемикання між аморфним (ізолюючим) та кристалічним (провідним) станами. Перемикачі PCM швидкі, компактні і мають низькі втрати. У порівнянні з мікроелектромеханічними системами (MEMS), PCM показали кращу надійність та швидкодію на частотах міліметрового діапазону. У роботах [17–19] вперше були продемонстровані ВЧ-перемикачі PCM GeTe для міліметрових хвиль та фазообертачі із справжньою затримкою за часом. В іншій розробці [20] був представлений монолітно інтегрований фазер на основі PCM для мініатюрних реконфігурованих додатків керування променем з фазованою антенною ґраткою міліметрового діапазону.

1.4 Фотонний кристал

Фотонний кристал – це штучна періодична структура, отримана шляхом вибудовування різних діелектричних матеріалів у послідовність, що повторюється, у вигляді надґратки. Завдяки наявності локалізованих дефектів періодичної структури фотонний кристал може керувати потоком світла, виступаючи як пастка або хвилевід. Порівняно зі своїми металевими аналогами фотонно-кристалічні хвилеводи виготовляються виключно з діелектричних матеріалів, що означає мінімізацію омичних втрат. Крім того, фотонно-

кристалічна структура може бути ефективно інтегрована на кремнієву платформу при збереженні низької собівартості компонента.

До теперішнього часу розроблені різні компоненти на фотонних кристалах [21] для використання в таких пристроях, як модулятори, фільтри високої роздільної здатності, датчики та лазери. До нових перспективних застосувань фотонних кристалів можна віднести біохімічні датчики, лідори та зв'язок у ТГц-діапазоні. В [22] представлений фотонно-кристалічний нанолазер для біомолекулярного та хімічного тестування. Фазовані фотонні ґрати на основі фотонних кристалів також успішно продемонстрували свої можливості в LiDAR-зондуванні [22]. Більш того, фотонні кристали показали свій потенціал у системах зв'язку в ТГц-діапазоні. У статті [23] представлена платформа системи зв'язку ТГц-діапазону на базі фотонних кристалів на кремнії. Розробники продемонстрували високу швидкість передачі даних за допомогою вбудованого резонансно-тунельного діодного детектора та фотонно-кристалічного хвилеводу.

Нещодавно топологічний фотонний кристал був досліджений як новий метод керування світлом [24]. Завдяки наявності топологічних фаз матерії ми можемо спрямовувати світло у заздалегідь визначеному напрямку навіть за наявності дефектів, оскільки існують топологічно захищені граничні стани. Крім того, було досліджено різні топологічні платформи для стійкого односпрямованого поширення світла, такі як нелінійні фотонно-кристалічні системи [25], неермітові системи [26] та топологічні системи вищого порядку [27]. Ці системи сприятимуть захисту поширення світла у нанорозмірних фотонних пристроях.

1.5 Фотоелектричні матеріали та фотодетектор

Коли фотонне випромінювання, що падає, досягає фотоелектричного матеріалу, в ньому генеруються електронні струми. Деякі звичайні фотоелектричні матеріали є кристалічними структурами на основі кремнію. З

розвитком нанотехнологій на сцену вийшли нові багатообіцяючі фотоелектричні матеріали, такі як квантові нанорозмірні точки, вуглецеві нанотрубки і графен, що мають безліч перспектив застосування.

Найбільш прямим і очевидним застосуванням фотоелектричної технології, ймовірно, можна вважати сонячні елементи, але ми не повинні ігнорувати CMOS-сенсори, які використовуються в цифрових камерах і багатьох інших додатках. Традиційно для сонячних елементів використовувалися напівпровідникові матеріали, такі як кремній. Згодом для підвищення ефективності фотоперетворення до складу структури було додано метал, що призвело до розробки чутливих фотодетекторів, наприклад, детектора Шотткі. Крім того, було доведено, що застосування нанорозмірних світловловлюючих шарів, таких як металеві наночастинки, збільшує концентрацію світла та розсіювання, що, у свою чергу, збільшує фотоелектричний ефект. Більш того, металеві ґратки також можуть сприяти збудженню поверхневих плазмонних хвиль, тим самим збільшуючи взаємодію між фотонами та електронами.

Фотодетектори на основі фотоелектричних матеріалів мають багато застосувань. Наприклад, квантові точки використовувалися для збільшення поглинання світла під час моніторингу стану здоров'я [28]. Було показано, що матриця фотоприймачів на основі вуглецевих нанотрубок [29] може створювати зображення з високою роздільною здатністю. Було виготовлено та продемонстровано браслет на основі масиву графенових фотодетекторів для моніторингу стану здоров'я [30]. Оскільки потреба у фотонних системах зростає, використання фотоелектричних матеріалів, як і раніше, призводитиме до створення компактних, а також високопродуктивних фотонних пристроїв.

1.6 Плазмонний матеріал

Плазмонні матеріали використовують енергію світла для генерації резонансних коливань носіїв заряду – плазмонів. Як згадувалося раніше, плазмонні наноструктури використовувалися у фотоелектричних пристроях

підвищення ефективності фотоперетворення. Двома поширеними плазмонними структурами є металеві наночастинки та металеві електроди з ґратчастим малюнком. Перша структура збільшує розсіювання світла з допомогою порушення резонансів локалізованих поверхневих плазмон-поляритонів (surface plasmon polariton, SPP), а друга збільшує довжину шляху світла, що з SPP [31]. Зазвичай в обох структурах використовуються золото та срібло. Повідомлялося про підвищення ефективності фотоперетворення до 30% з наночастинками золота [32]. З іншого боку, [33] повідомляється про збільшення ефективності на 19% при використанні електрода з ґратами зі срібла.

Теоретична фізика твердого тіла вивчала плазмонні матеріали з 1970-х років [34], але зараз вони створюються в лабораторіях, а технологія плазмонних метаматеріалів за останнє десятиліття зробила великий ривок. Метаматеріали можна використовувати для отримання матеріалів з бажаними властивостями, періодично маніпулюючи розподіленими штучними структурами. Спочатку вони використовувалися в мікрохвильовому діапазоні. Для роботи в оптичному діапазоні потрібні структури нанометрового розміру, які важко виготовити. У статті [35] було надано докладний огляд того, як реалізувати негативне заломлення на оптичних частотах. [36] сітчаста структура, що складається з двох шарів металевих сіток з діелектричною прокладкою між ними, була запропонована як приклад компонента з негативною діелектричною проникністю, прозорого в ближньому інфрачервоному діапазоні. Також було продемонстровано пакетний хвилевід метал-діелектрик-метал з негативним показником заломлення на видимих частотах [37].

Плазмонні метаповерхні складаються із плазмонних структур нанометрового розміру з різною геометрією та роздільниками, надрукованими на тонкій пластині. Керуючи фазовим профілем наноструктур, метаповерхні можуть використовувати різні конфігурації падаючого світла для генерації бажаних відгуків. Нещодавно було доведено, що, крім більш загальних функцій, таких як керування променем, генерація променя з орбітальним кутовим моментом (orbital angular momentum, OAM) і керування відбитим променем,

плазмонні метаповерхні здатні керувати оптичними поверхневими хвилями в ближній області поля [38]. Коли візерункові наноструктури взаємодіють зі світлом, частина енергії, що повторно випромінюється, перетворюється в SPP в ближньому полі. Шляхом ретельного проектування форми та орієнтації наноструктур можна керувати збудженням SPP відповідно до таких завдань, як зондування у ближньому полі та біохімічне виявлення.

Поверхневі плазмонні поляритони також можуть виникати в графені. Як згадувалося раніше, графен може працювати як матеріал, що реконфігурується завдяки електрично настроюваним властивостям. Більше того, графен може виявляти плазмову поведінку в ТГц- та інфрачервоному діапазоні частот. У графені збудження SPP обмежене поперечним розміром. Отже, графенові плаزمони можуть взаємодіяти з хвилями значно меншої довжини та забезпечувати сильнішу взаємодію світла з речовиною порівняно з металевими аналогами. Крім того, використовуючи гібридизацію графену та інших звичайних плазмонних наноструктур або метаматеріалів, можна створювати ще більш просунуті пристрої на основі графену. Ось чому це перспективний напрямок майбутнього з різних точок зору.

Плазмонні матеріали, що взаємодіють із хвильовим випромінюванням, викликають інтерес у багатьох областях. Наприклад, графенові антени показали, що їх унікальна поведінка, що настроюється, і потенціал плазмонного резонансу можна використовувати в багатьох пристроях ТГц-діапазону. Використовуючи ефект збудження SPP на плазмонних метаповерхнях, інтелектуальні багатофункціональні поверхні можуть виконувати не тільки керування променем, а й служити біосенсорами. При досягненні поглибленого розуміння природи SPP, а також поведінки матеріалів, що підтримують SPP, знайдуться нові цікаві застосування для плазмонних матеріалів.

1.7 Висновки до розділу 1

Розглянуто сучасні технології, що дозволяють більш ефективно і компактно інтегрувати як фотонні, так і електронні компоненти на одному кремнієвому кристалі. Очікується, що прогрес, досягнутий в області кремнієвої платформи, призведе до того, що в найближчому майбутньому ми станемо свідками більш досконалих компактних і недорогих фотонних і електронних пристроїв.

2 СЦЕНАРІЇ ВИКОРИСТАННЯ НОВОГО ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

2.1 Антена з фотопровідною лінзою

Як згадувалося раніше, РСА може перетворювати енергію фотонів на ТГц-випромінювання. Однак ефективність фотоперетворення зазвичай невелика, що, у свою чергу, призводить до низької випромінюваної потужності (мкВт). Тим не менш, ми можемо використовувати діелектричну лінзу, щоб колімувати вихідні промені і зрештою збільшити підсилення антени.

У типовій антені лінза живиться від тонкої підкладки з високою діелектричною проникністю, де надруковані плоскі електроди антени. До традиційних типів антен відносяться диполі, «метелики», спіральні та логоперіодичні. До антени прикладають зовнішнє напруження усунення, щоб прискорити перехідні фотоструми, і зрештою терагерцова хвиля випромінюється у простір. Щоб зменшити неузгодженість та максимізувати характеристики антени, нам необхідно розробити лінзи оптимального розміру та форми.

Дослідники активно розробляють нові методи підвищення ефективності фотоперетворення. Наприклад, фотопровідний зазор вносили наноструктури [6] для збільшення розсіювання хвиль або збудження плазмонних хвиль [7], тим самим збільшуючи ефективність фотопари. Як покриття для збільшення поглинання світла також використовувалися квантові точки [8].

Для збільшення швидкості візуалізації середовища було запропоновано структури з ґратами у фокальній площині. Один з варіантів включає підключені антенні решітки, які надруковані на живильній підкладці і живлять лінзи з великою апертурою. Решітки можна налаштувати для керування променем або формування променя, і ця конфігурація призначена для сканування навколишнього середовища та телекомунікаційних систем. В іншому варіанті застосовується близько розташована лінза, розміщена поверх антенних елементів, щоб сформувати щільно упаковані ґрати. Ця структура більше

підходить для космічних або астрономічних програм, де переважно наявність функції багатопіксельного сканування. Ці два варіанти [9] показано на рис. 2.1.

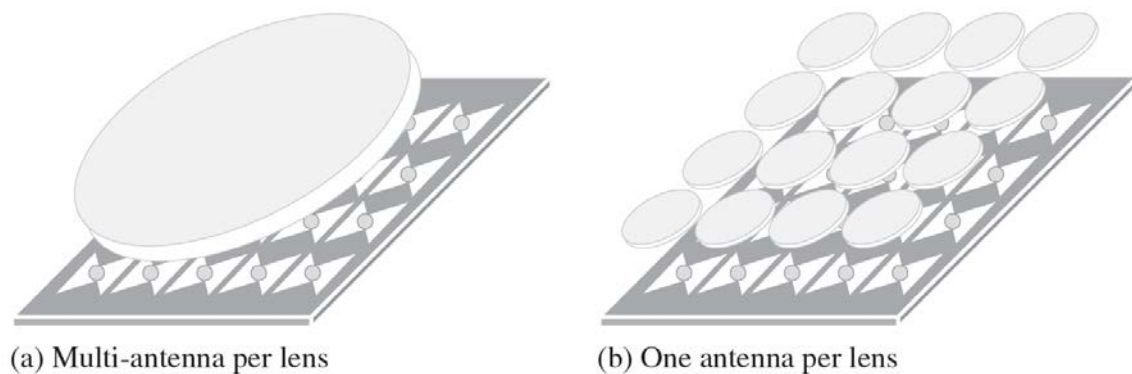


Рисунок 2.1 – Антени з фотопровідними лінзами

2.2 Антенні решітки

Відбивні та передавальні решітки знаходять безліч застосувань, включаючи розширення діапазону зв'язку, бездротову передачу енергії, просторову модуляцію і антени з високим коефіцієнтом підсилення. Обидві ґрати мають низький профіль, високу ефективність та підтримують реконфігурацію. Це означає, що їх можна легко інтегрувати в різні системи, і тому вони є багатообіцяючими кандидатами на використання в комунікаціях наступного покоління.

У решітках, що відбивають, використовуються різні розсіювачі електромагнітного випромінювання, надруковані на поверхні. При освітленні фідерної антеною решітки відбивають поведуться як традиційні рефлекторні антени. Розсіювачі можуть набувати форми мікросмужкових плям (або інших типів резонансних структур), як показано на рис. 2.2. Кожен розсіювач ретельно проектується для створення фазового зсуву, що імітує вигнуту поверхню відбивача і, отже, відбиває промінь із заданими властивостями.

Розсіювачі можуть бути сополяризовані без зміни поляризації падаючого поля. Вони також можуть мати подвійну поляризацію або крос-поляризацію,

щоб по-різному відображати падаючі промені з різною поляризацією або змінювати її. Ми можемо зробити рефлектор реконфігурованим, щоб у будь-який момент змінювати напрямок відображення променя. Для створення фазового профілю, що реконфігурується, можуть застосовуватися і незалежно управлятися такі сучасні перебудовуються матеріали, як рідкі кристали і графен.

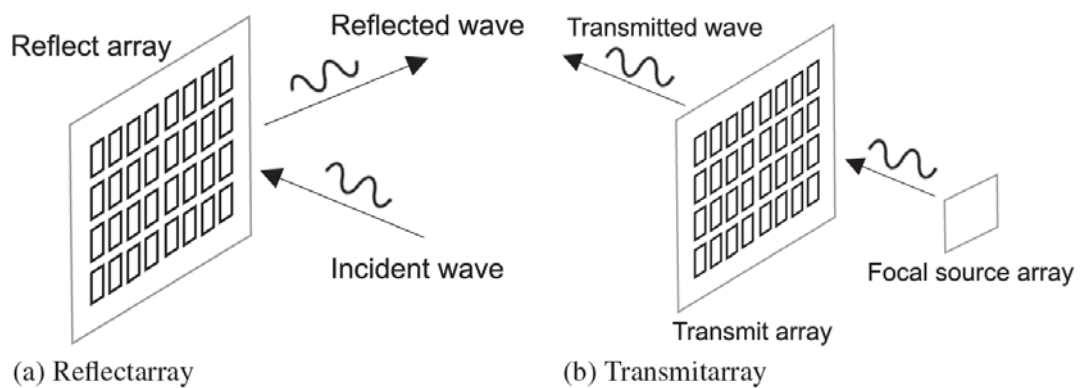


Рисунок 2.2 – Відбивні та передавальні решітки

Так само передавальна решітка складається з плоскої підкладки з кілька друкованими резонаторами, що володіють заданим фазовим розподілом. Коли решітка розташована у фокусі джерела висвітлює передавальну решітку, хвиля, що падає, проходить через площину передавальної решітки і потім перетворюється в промінь з бажаною діаграмою спрямованості. У більшості випадків передавальна решітка поводить себе як плоска діелектрична лінза. Варто зазначити, що функція керування променем може бути реалізована як в площині джерела, так і в площині решітки. Наприклад, спочатку можна налаштувати джерело, яке знаходиться у фокусі. Потім у площині решітки, що передає, маніпулюють резонаторами для надання бажаних властивостей вихідному променю.

2.3 Метаповерхні

Метаповерхні надають привабливі рішення щодо організації випромінювання для багатьох нових застосувань. Завдяки гнучкості керування метаповерхні "програмуються" за допомогою цифрової платформи [10]. Крім того, вони мають невеликі розміри, що забезпечує недорогу інтеграцію з різними платформами. Надруковані на гнучкій підкладці метаповерхні можуть входити в склад пристроїв, що носяться, потенційно придатних для зв'язку, отримання зображень і більш складних варіантів застосування. Наприклад, [11] було продемонстровано програмоване інтелектуальне метаповерхнєве скло, яке забезпечує повне проникнення, часткове і повне відображення падаючих радіохвиль. Це скло може знайти застосування керування характеристиками каналу в системах бездротового зв'язку.

У мікроскопічному поданні кожен елемент елементарного осередку може мати частотну характеристику, виражену в змінних значеннях амплітуди та фази. Для досягнення незалежного керування в кожному елементарному осередку можуть бути застосовані елементи, що налаштовуються. Макроскопічно елементарні осередки можуть бути спроектовані так, щоб формувати електромагнітно взаємопов'язану мережу, яка конструктивно виконує задані функції, наприклад, поглинання хвиль, придушення поверхневих хвиль, розв'язки антени, формування променя і т.д.

Для метаповерхневих антен елементарні осередки ретельно проектують таким чином, щоб узгодити амплітуди та фазу для отримання бажаної діаграми спрямованості у вільному просторі. Кожен елементарний осередок служить невеликим випромінювачем з певними параметрами, що, своєю чергою, дозволяє об'єднаному променю всіх елементів прийняти необхідну форму. Антени передавача та приймача можуть бути інтегровані на одній підкладці, і ми можемо реалізувати окремі хвилеводні структури для підключення випромінювачів до вхідного або вихідного сигнального порту.

Одним із найцікавіших застосувань, ймовірно, є метаповерхнева голографія. У голографії інформація про амплітуду і фазу світлових хвиль, розсіяних об'єктом, записується і кодується на фотоплівці. Потім ми застосовуємо алгоритм реконструкції зображення для створення тривимірної голограми, що виглядає як реальний об'єкт. Метаповерхні можуть використовуватися для запису інформації голограми такого типу, оскільки елементарні осередки можуть діяти як пікселі. Іншими словами, кожен елемент може зберігати певні амплітудну та фазову характеристики. При наступному висвітленні хвилями певної конфігурації відображення цих елементів можуть бути накладені один на одного для створення тривимірної голограми вихідного об'єкта. Принцип роботи показано на рис. 2.3.

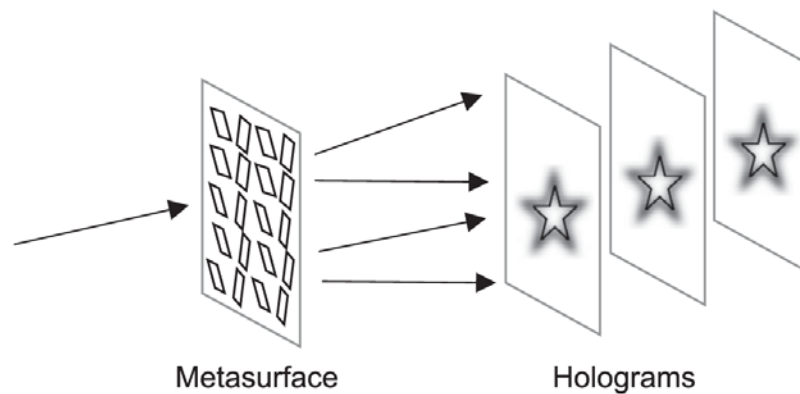


Рисунок 2.3 - Голограми, створені метаповерхнею

Ще одне цікаве застосування метаповерхні – маскування. Вона полягає в розміщенні тонкого метаповерхневого шару на певній відстані від об'єкта, що маскується, що, у свою чергу, дозволяє створити «противофазну» деструктивну інтерференцію, яка нейтралізує розсіювання. Кінцевим результатом є об'єкт, "невидимий" на певній частоті. Додаючи активні елементи метаповерхні ми можемо розширити робочу смугу частот.

2.4 Нанофотодетектори

Як згадувалося раніше, платформи формування зображень з робочою частотою вище 1 ТГц залишаються проблемними через обмеження швидкодії кремнієвих компонентів. Сучасні системи побудови зображень «за межами 1 ТГц» переважно ґрунтуються на великих оптичних системах і надто громіздкі для інтеграції. Тому необхідна портативна та зручна вимірювальна система. Завдяки розвитку нанотехнологій ця задача може бути вирішена за допомогою нанофотодетекторів.

Останні розробки в галузі нанотехнологій відкрили нові можливості для отримання зображень у ТГц-діапазоні. Нанофотодетектори невеликі, що масштабуються, економічні та енергоефективні, їх можна інтегрувати в різні системи побудови зображень за достатнього рівня швидкодії.

Потенційним кандидатом використання у цій галузі є чутлива матриця з вуглецевих нанотрубок (carbon nanotube, CNT). Використовуючи фототермоелектричний ефект, CNT можуть перетворювати висвітлююче ТГц-випромінювання у вимірюваний фотострум у ланцюгу зчитування. У статтях [12, 13] повідомляється, що скануючий масив CNT для отримання зображень може досягати просторової роздільної здатності кілька сотень мікрометрів на частоті 1,4 ТГц. Крім того, пропонований масив CNT може бути виготовлений на гнучкій підкладці для використання в мобільних пристроях.

Графеновий фотодетектор працює аналогічно до сенсора CNT. Він може перетворювати освітлююче ТГц-випромінювання на вимірюваний фотострум. При цьому гнучкий браслет із графеновим фотодетектором можна використовувати для спостереження за станом здоров'я. Крім того, прозорість графена означає, що його можна використовувати для екранних антен, інтелектуальних окулярів, пристроїв, що носяться, і т.д.

2.5 Антена на кристалі та антена в корпусі

Досягнення напівпровідникових технологій, таких як CMOS та SiGe BiCMOS, дозволили нам створити інтегральну схему ТГц-діапазону. За допомогою технології SiGe HBT20 цілком можливо виготовляти інтегральні схеми з робочою частотою до 700 ГГц. Оцінки показують, що межа продуктивності SiGe HBT може невдовзі досягти або навіть перевищити 1 ТГц. Кремнієва терагерцова інтегральна схема має ряд переваг, таких як низька вартість, компактний розмір, високий вихід та простота інтеграції.

Зручний спосіб реалізації ТГц-антени має на увазі її пряму інтеграцію із вхідною схемою на кремнієвій підкладці. Однак розміщення антени на кристалі є складним завданням через поверхневі хвилі, що генеруються в підкладці. Поверхневі хвилі заважатимуть випромінюванню антени та призведуть до поганої роботи пристрою. Для боротьби з цим явищем було запропоновано лінзову антену зі зворотним випромінюванням. Застосування такої антени для отримання зображень та зондування у ТГц-діапазоні продемонстровано в [18, 19].

Нове застосування ТГц-випромінювання – це терагерцеве сканування у ближньому полі (near-field imaging, NFI). У випадку NFI просторова роздільна здатність зображення не обмежена дифракційною межею і може застосовуватися для отримання зображень у мікроскопічному або нанорозмірному масштабі. NFI вимагає, щоб антена мала сильний зв'язок у ближньому полі. Наприклад, [20] було доведено, що резонансні структури, такі як резонатори з роз'ємним кільцем (splitring-resonators, SRR), здатні створювати біометричні зображення відбитків пальців людини.

Підхід «антени в корпусі» дає нам ще один спосіб інтеграції. Однак на терагерцових частотах з'єднання між антеною та монолітною мікрохвильовою інтегральною схемою (monolithic microwave integrated circuit, MMIC) занадто великі. На щастя, зараз розробляються ефективні методи побудови корпусів для вирішення цієї проблеми та мінімізації втрат. Інтегрована хвилеводна рупорна

антена на частоті 300 ГГц була виконана в багатошаровому пакеті LTCC [21] і продемонстрована у дії в сервісі завантаження даних KIOSK21.

2.6 Орбітальний кутовий момент

Традиційно пропускну здатність радіолінії збільшували за рахунок мультиплексування простору, частоти, часу, коду та поляризації. Потім для поліпшення характеристик передачі розробили MIMO-антену з різною поляризацією. Останнім часом багато уваги привернув новий аспект мультиплексування – орбітальний кутовий момент (orbital angular momentum, OAM). Згідно з новим підходом, при використанні OAM антена може генерувати ортогональні моди, кожна з яких пов'язана з різним орбітальним моментом. Наприклад, сигнал може мати фазовий коефіцієнт $e^{-j\varphi}$, $e^{-j2\varphi}$ і т. д. Кожен режим може нести різну інформацію; отже, кілька режимів OAM можуть співіснувати і передавати дані одночасно по одному каналу зв'язку. Правильно виділивши необхідний режим OAM за приймача, можна оптимізувати ефективність використання спектра.

Системам зв'язку OAM було присвячено значну кількість досліджень. Наприклад, [22] було запропоновано генерувати хвилі OAM шляхом керування фазовими модами з використанням круглої решітки з декількома фазообертачами і суматорами. Досліджено систему мультиплексування OAM-MIMO, яка використовує кілька однорідних кільцевих антен для генерації п'яти режимів OAM та визначено, що системи зв'язку OAM дозволяють досягти високої швидкості передачі.

Технологія OAM має великий потенціал у бездротових сценаріях LOS, таких як транзитна мережа стільникового зв'язку і між'єднання в центрі обробки даних. Крім того, комбінований зв'язок OAM-MIMO значно збільшить швидкість передачі даних та забезпечить набагато більш високу ефективність використання спектра. Наприклад, [5] повідомляється про систему зв'язку з мультиплексуванням OAM-MIMO, яка забезпечує швидкість передачі даних 100

Гбіт / с на відстані 10 м. Запропонований метод мультиплексування використовує 11 режимів ОАМ на частоті 28 ГГц.

ОАМ – перспективна технологія передачі даних, тому зараз активно розглядаються способи її застосування в мережах 6G. Через особливості передавальної антени масиву ОАМ на практиці діапазони частот, які дозволяють 6G використовувати системи ОАМ, будуть перевищувати 20 ГГц, і, як такі, діапазони міліметрових хвиль є хорошими кандидатами. Було зроблено кілька спроб створення компактної антенної архітектури та конструкції антенної решітки міліметрового діапазону [26, 27]. Основна проблема, пов'язана з програмою ОАМ, відноситься до реалізації сценаріїв використання мобільності. У цьому контексті необхідні технологічні прориви, які дозволять нам використовувати прості антени на стороні обладнання для демодуляції сигналів ОАМ, особливо коли йдеться про підтримку мобільних застосувань [28].

2.7 Висновки до розділу 2

Детально розглянуті досягнення напівпровідникових технологій, таких як CMOS та SiGe BiCMOS, які дозволили створити інтегральну схему ТГц-діапазону. Досліджено нові методи підвищення ефективності фотоперетворення. Крім того, розглянуто антени передавача та приймача, які можуть бути інтегровані на одній підкладці, що дозволяє реалізувати окремі хвилеводні структури для підключення випромінювачів до вхідного або вихідного сигнального порту.

3 СУЧАСНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ТГц-ДІАПАЗОНУ

У цьому розділі ми стисло описуємо сучасні технології ТГцдіапазону. Спочатку обговоримо компоненти систем ТГц-діапазону та порівняємо їх характеристики у різних технологіях. Потім проаналізуємо продуктивність систем зв'язку та формування зображень у ТГц-діапазоні та на закінчення обговоримо проблеми, пов'язані з ТГц-діапазоном, та поточний стан відповідних досліджень.

3.1 Компоненти ТГц-систем

Як згадувалося раніше, ТГц-система може бути реалізована за допомогою електронного або фотонного підходу. Зокрема, фотонна технологія в основному використовує верхні частоти ТГц-діапазоні, електронна технологія може забезпечити рішення в нижніх частотах діапазону. Максимальна частота, на якій може працювати терагерцова електронна схема, залежить від максимальної частоти f_{\max} транзистора, виготовленого за певним твердотільним техпроцесом.

У традиційних технологіях CMOS і BiCMOS f_{\max} транзистор знаходиться в діапазоні від 200 ГГц до 350 ГГц [1]. Завдяки технології SiGe BiCMOS транзистор може досягати f_{\max} 0,5 ТГц або 0,75 ТГц [2]. Напівпровідники типу III–V, такі як транзистори з високою рухливістю електронів (HEMT) на основі InP або біполярні транзистори з гетеропереходом (HBT), можуть підняти f_{\max} більш ніж до 1 ТГц [3]. Відповідні технологічні дорожні карти були розроблені як InP-, так SiGe-технологій [1]. Очікується, що найближчим часом терагерцова електроніка перевищить 1 ТГц і досягне 2 ТГц з використанням технологій SiGe CMOS і III–V.

3.1.1 Електронний підхід

Через фундаментальне обмеження частоти транзистора f_{\max} електронний підхід в основному націлений на системи, що працюють на нижчих частотах ТГц-діапазону. Вихід за межі цих частот вимагає ретельного проектування системи, щоб зменшити нелінійність пристрою та гармонійні ефекти, які починають істотно впливати.

Використовуючи проведені порівняння сучасних джерел ТГц-випромінювання як у CMOS, так і SiGe-технологіях наводимо перелік джерел ТГц-випромінювання, виконаних за технологією InP НЕМТ/НВТ у табл. 3.1 та характеристики джерел InP ТГц-діапазону за межами 300 ГГц, а на рис. 3.1 та 3.2 дано порівняння джерел ТГц-діапазону, виготовлених за різними технологіями. Як показано на рисунках, більшість джерел ТГц-діапазону працюють на частотах від 0,2 до 0,5 ТГц з рівнем вихідної потужності від -10 дБм до +10 дБм. При аналогічному рівні вихідної потужності джерела InP демонструють кращу ефективність використання постійного струму до радіочастоти (ставлення вихідної потужності радіосигналу до споживаної потужності постійного струму). Для діапазону частот вище 0,5 ТГц були представлені дані всіх трьох джерел ТГц-випромінювання, заснованих на відповідних технологіях. Джерела CMOS та SiGe демонструють нижчий рівень вихідної потужності, оскільки робоча частота перевищує f_{\max} , а ефективність знижується через гармонійний ефект. Вища вихідна потужність досягається за допомогою джерел InP [5, 6], що важливо для формування ТГц-променя і керування ним.

Таблиця 3.1. Порівняння сучасних джерел ТГц-випромінювання на основі

InP

Технологія	Частота (ГГц)	Процес (нм)	P_{out} (дБм)	P_{DC} (мВт)
InP HBT	300	250	+5.3	87.4
InP DHBT	300	250	+4.8	88
InP DHBT	300	250	-5	46.2
InP DHBT	300	250	+1.5	148
InP DHBT	300	130	+4.7	75.6
InP DHBT	303	800	-6.2	37.6
InP DHBT	306	800	-1.6	36
InP DHBT	325	800	-7	40
InP DHBT	330	250	-6.5	13.5
InP HBT	413	250	-5.6	<115
InP DHBT	480	300	-11	15
InP HBT	487	250	-8.9	<115
InP HBT	573	250	-19.2	<115
InP HBT	591	250	-17.4	49.3
InP HBT	645	250	-17.4	49.3
InP HEMT	670	25	+2.55	1.7

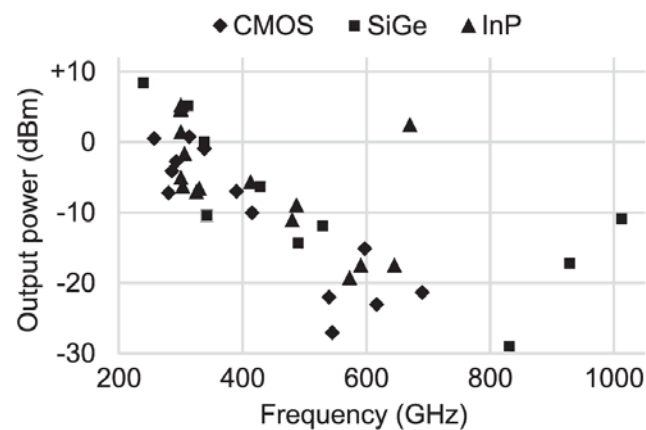


Рисунок 3.1 - Порівняння вихідної потужності сучасних джерел ТГц-діапазону, виготовлених за технологіями CMOS, SiGe та InP. Дані для CMOS та SiGe взяті з [4], а дані для InP - з табл. 3.1

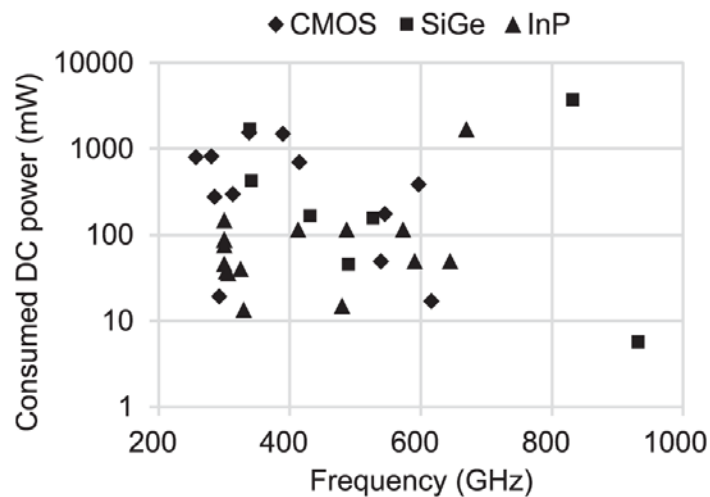


Рисунок 3.2 - Порівняння потужності постійного струму, що споживається сучасними джерелами ТГц-діапазону в технологіях CMOS, SiGe та InP. Дані для CMOS та SiGe взяті з [4], а дані для InP - з табл. 3.1

У попередніх роботах порівнювалися різні підсилювачі потужності ТГц-діапазону, які використовують технології CMOS, SiGe, GaAs та InP [18–20]. Детальне порівняння різних технологій підсилювачів наведено в [20], хоча частота переважно не перевищує 100 ГГц. Порівняння характеристики сучасних підсилювачів потужності на частотах 110–180 ГГц з використанням як CMOS-, так і SiGe-технологій і показали, що при вихідній потужності до 20 дБм ККД перетворення постійного струму на випромінювання, як правило, становить менше 10 %. Підсилювачі потужності на основі InP на частоті близько 200 ГГц порівнювалися в [19], де показано, що вихідна потужність 20-30 дБм може бути згенерована з ККД також менше 10%. У цьому розділі було проведено неповний огляд літератури з підсилювачів потужності на частотах понад 300 ГГц. У табл. 3.2 та на рис. 3.3 порівнюються характеристики підсилювачів потужності, виконаних за різними технологіями. Були продемонстровані підсилювачі потужності на основі GaAs та InP, що працюють на частоті близько 300 ГГц, хоча підсилювачі на основі InP показали вищий рівень вихідної потужності. Подальші роботи [21, 22] розширили робочі частоти підсилювачів на основі InP до 850 ГГц.

Таблиця 3.2. Порівняння сучасних підсилювачів потужності ТГц-діапазону, виготовлених по різних технологіях

Технологія	Процес (нм)	Частота (ТГц)	Підсилення (дБ)	P_{SAT} (дБм)	P_{DC} (дБм)	PAE
CMOS SOI	32	210	15	4.6	40	6.00 %
SiGe BiCMOS	130	230	12.5	12	740	1.00 %
SiGe BiCMOS	130	215	25	9.6	-	0.50 %
GaN	50	190	12	14.1	-	1.20 %
InGaAs mHEMT	35	320	13.5	8.6	-	-
InGaAs mHEMT	35	320	12	7	-	-
InGaAs mHEMT	35	310	7	8.5	521	-
InGaAs mHEMT	35	294	15	4.8	-	-
InP HEMT	50	340	15	10	-	-
InP HBT	250	300	12	9.2	848	1.10 %
InP HBT	250	300	13.4	13.5	-	-
InP HBT	130	325	10	9.4	243	2.20 %
InP HBT	130	325	9.4	11.4	243	1.09 %
In PDHBT	250	325	11	1.13	-	0.60 %
InP HEMT	80	300	20	12	-	-
InP HEMT	80	300	14	9.5	-	-
InP DHBT	130	670	24	-4	-	-
InP DHBT	130	655	20	-0.7	-	-
InP HBT	130	585	20	2.8	455	-
InP HEMT	25	850	17	-0.3	60	-

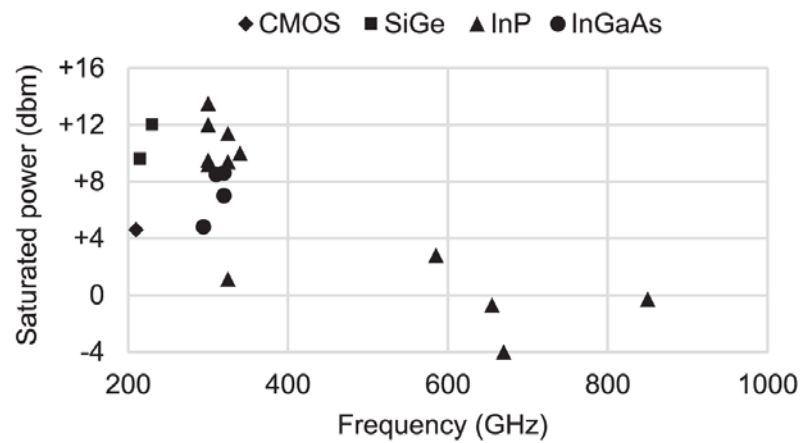


Рисунок 3.3 - Порівняння сучасних підсилювачів потужності, виконаних за різними технологіями. Дані для CMOS та SiGe взяті з [4], а дані для InP - з табл.

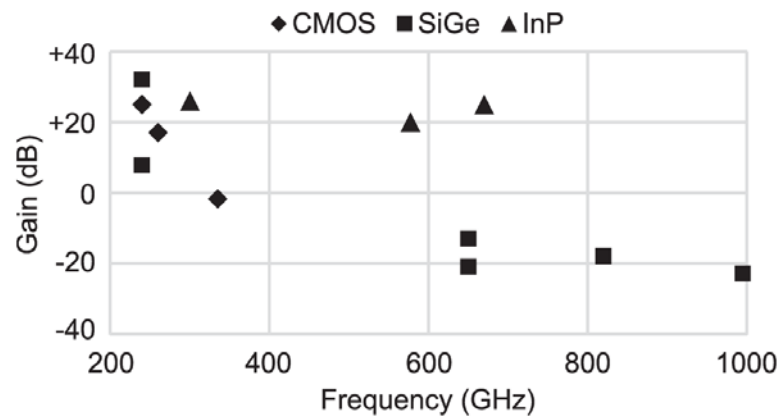
3.2

Приймачі ТГц-діапазону можна розділити на гомодинні/гетеродинні та прямі детекторні.

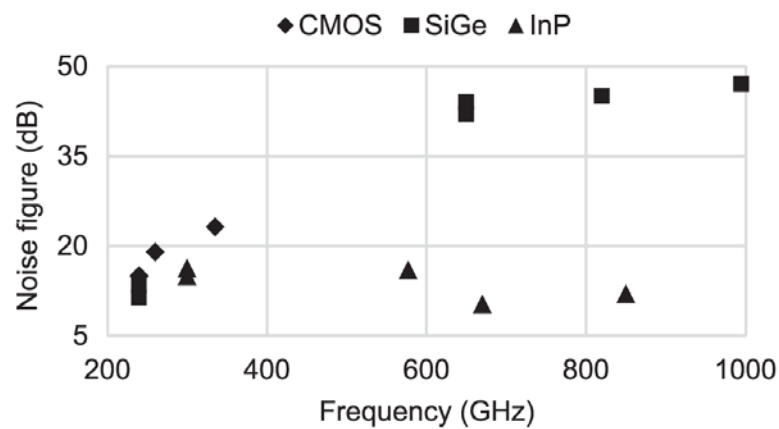
Таблиця 3.3 - Порівняння сучасних приймачів ТГц-діапазону, виконаних за різними технологіями

Технологія	Процес (нм)	Частота (ТГц)	Підсилення (дБ)	Коеф.шуму (дВ)	Розсіююча потужність (мВт)
InP HBT	130	577	20	16	-
InP HEMT	25	850	-	12	1160
InP HEMT	25	670	25	10.3	1800
InP HEMT	80	300	-	15	-
InP DHBT	250	300	26	16.3	482
Технологія	Процес (нм)	Частота (ТГц)	Чутливість (кВ/Вт)	NEP (нВт/Гц ^{0.5})	
InP DHBT	250	280	350	0.13	
InP HBP	250	300	40	35	
GaAs HEMT	-	271	42	135	
GaAs HEMT	-	632	1.6	1250	
GaAs HEMT	-	650	70	300	

Здійснено порівняння різних приймачів ТГц-діапазону, заснованих на технологіях CMOS та SiGe, що працюють у діапазоні від 200 ГГц до майже 1 ТГц. Тут ми наводимо неповний огляд приймачів ТГц-діапазону, виконаних за технологіями InP та GaAs. У табл. 3.3 на рис. 3.4 та рис. 3.5 порівнюються характеристики приймачів ТГц-діапазону в різних технологіях. Як показано на рис. 3.4, приймачі InP та SiGe працювали на частотах вище 500 ГГц.



(a) Gain performance comparison



(b) Noise figure comparison

Рисунок 3.4 - Порівняння сучасних гомодинних/гетеродинних приймачів, виконаних за різними технологіями. Дані для CMOS та SiGe взяті з [4], а дані для InP - з табл. 3.3

Повідомлялося про підсилення до 25 дБ на частоті 670 ГГц із використанням технології InP НЕМТ [38]. Також у публікаціях йшлося про декілька трансівери InP НЕМТ для використання в ТГц-зв'язку [39–41]. Кремній-германієві приймачі

переважно застосовуються для отримання зображень і сканування в ТГц-діапазоні [42].

Більшість прямих детекторів інтегровані з антенами і тому відомі як прямі детектори зі зв'язаною антеною. Двома найбільш поширеними формами інтеграції є антени на кристалі та зовнішні гіперполусферичні кремнієві лінзові антени. Для оцінки характеристик підсилення та чутливості цих детекторів використовуються такі критерії, як чутливість та еквівалентна потужність шуму (noise-equivalent power, NEP). Порівняно з гомодинними/гетеродинні приймачі, прямі детектори вносять набагато більший шум в робочих діапазонах. В результаті вони в основному використовуються у сценаріях, пов'язаних зі скануванням та візуалізацією, де вимоги до шуму можуть бути дещо ослаблені.

3.1.2 Гібридний та фотонний підходи

Як згадувалося в попередньому розділі, непряма заборонена зона кремнію перешкоджає інтеграції в кристал активних оптичних джерел, таких як лазери. Щоб усунути це обмеження, потрібна гетерогенна платформа III–V/кремній, яка забезпечить повну інтеграцію різних оптичних компонентів, таких як лазери, оптичні підсилювачі та модулятори на одній кремнієвій пластині. Це перспективний напрямок розробок для наступного покоління фотонних інтегральних схем.

При інтеграції напівпровідникових компонентів III–V на кремній застосовують два підходи: пряме вирощування матеріалів III–V на кремнієвій підкладці і гетерогенна інтеграція за допомогою з'єднання пластин. Обидва підходи продемонстрували свою готовність до випуску комерційних продуктів.

Першу демонстрацію гетерогенних III–V/кремнієвих лазерів із розподіленим зворотним зв'язком було проведено у 2008 р. [48]. З того часу було досягнуто значного прогресу [49, 50]. Керуючи локалізацією електронів у квантових ямах між шарами гетероструктури (наприклад, InGaAs та GaAs), лазери на основі матеріалів III–V/кремнію можуть забезпечити покращені

характеристики, такі як більш швидка модуляція та більш висока ефективність порівняно зі звичайними лазерами. У лазерах із квантовими точками (quantum dot, QD) використовуються квантові точки в активній області, і їх можна вирощувати безпосередньо на кремнієвій підкладці. Використання квантових точок в активній області дозволяє утримувати носії заряду в тривимірному просторі, що призводить до виникнення енергетичних станів, подібних до тих, що властиві атомам. Ця властивість дає можливість забезпечити кращу ефективність при високих температурах, нижчий пороговий струм і триваліший термін служби порівняно з лазерами на квантових ямах та звичайними лазерами.

Оптичні підсилювачі, як випливає з назви, підсилюють оптичні сигнали в напівпровідниковому середовищі. Матеріали типу III–V допускають більш швидке перемикання, оскільки час життя носіїв коротший через їхню пряму заборонену зону. Перша демонстрація оптичного підсилювача на основі III–V/кремнію була проведена в 2007 [51], після чого був досягнутий значний прогрес. Огляд різних недавніх досягнень у галузі гетерогенних оптичних підсилювачів з III–V/кремнію представлений у [52]. Наприклад, [53] повідомили про оптичний підсилювач з III–V/кремнію з підсиленням до 28 дБ, а в [52] продемонстрували оптичний підсилювач з III–V/кремнію з вихідною потужністю в режимі насичення до 16,8 дБм. Гетерогенний оптичний підсилювач дозволив знайти нові застосування інтегральних фотонних схем, наприклад у пристроях керування променем, таких як LiDAR.

Оптичні модулятори переносять електричні сигнали світлову область. Звичайні кремнієві оптичні модулятори використовують ефект плазмової дисперсії в пристроях кремнієвих, де показник заломлення матеріалу змінюється в залежності від зміни щільності вільного заряду. Ця зміна призводить до змін фази, які згодом перетворюються на амплітудну модуляцію за допомогою інтерферометра або резонатора. Використання матеріалів III–V у гетерогенній платформі може допомогти покращити характеристики модулятора, пропонуючи велику зміну показника заломлення, високу рухливість електронів та багато іншого [49]. Крім того, використання квантових ям дозволяє отримати

квантово-індукований ефект Старка (коефіцієнт поглинання матеріалу змінюється зі зміною електричного поля) і може запропонувати рішення швидкої комутації оптичних модуляторів [54].

Фотодетектор на фотонній платформі функціонально еквівалентний антені. Він повинен бути достатньо чутливим, щоб використовувати потужність, яка відповідає вимогам до коефіцієнта бітових помилок (bit error rate, BER) при заданій швидкості передачі даних. Популярним кандидатом на матеріал для фотодетекторів є германій (Ge) через високу пропускну здатність, хорошу чутливість і здатність легко інтегруватися в платформи на основі CMOS. Фотоприймач на основі матеріалів III-V, як правило, може запропонувати порівняні або найкращі характеристики. Фотоприймач типу III-V із смугою пропускання понад 67 ГГц та чутливістю до 0,7 А/Вт був продемонстрований у [55].

3.2 Системи ТГц-діапазону

Розробка різних компонентів ТГц-діапазону, придатних для розміщення на високоінтегрованій платформі, дозволила освоїти безліч застосувань ТГц-діапазону. Наприклад, платформи на основі SiGe використовувалися у додатках для бездротового зв'язку, сканування та візуалізації в ТГц-діапазоні, переважно на частотах нижче 300 ГГц [4]. Крім цього, розвиток технологій матеріалів III-V - наприклад, з використанням InP - показало, що на їх основі можна створювати швидкодіючі ТГц-системи, як обговорювалося в попередніх розділах. Гетерогенна інтегрована платформа III-V/кремній є перспективним варіантом для створення як комерційних, так і промислових портативних ТГц-систем.

3.2.1 Терагерцові системи зв'язку

Бездротовий зв'язок у терагерцовому діапазоні продемонстрував великий потенціал у багатьох засобах зв'язку малого радіусу дії у певних частотних «вікнах» (наприклад, 140, 220 та 300 ГГц). Цільова група IEEE 802.15.3d досліджувала спектр 252–325 ГГц і визначила варіанти використання, такі як кіоски для завантаження даних, внутрішньочіповий/внутрішньоплатний радіозв'язок, бездротовий зв'язок у центрах обробки даних, а також мобільні кінцеві та транзитні канали [56]. У цьому розділі ми підсумовуємо характеристики сучасної системи ТГц в діапазоні 275–450 ГГц.

Як згадувалося в попередніх розділах, спектр у терагерцовій області може зазнавати великих втрат на трасі через сильне атмосферне згасання. У табл. 3.4 оцінюється бюджет лінії зв'язку на частотах 275–450 ГГц з підсиленням антени при передачі (Tx) та прийомі (Rx) 30 дБ, а також потужністю Tx 0 дБм, відстанню між лініями 10 м та коефіцієнтом шуму 15 дБ. Оскільки втрати на трасі великі (~100 дБ), як компенсація необхідний вузьконаправлений стрижневий промінь.

Таблиця 3.4 - Оцінка бюджету лінії зв'язку на частотах 275-450 ГГц

Потужність Tx (дБм)	Частота (ГГц)	Відстань (м)	PL (дБ)	Атм. Затухання (дБ/км)	Коеф. Шуму (дБ)	Підсилення антени Tx/Rx	Потужність Rx (dBm)
0	275-296	10	-101.5	10	15	30	-56.5
0	306-313	10	-102.3	16	15	30	-57.4
0	318-333	10	-102.7	20	15	30	-57.9
0	356-450	10	-104.5	10	15	30	-59.6

У табл. 3.5 наведено невичерпний перелік параметрів останніх сучасних систем бездротового зв'язку ТГц-діапазону та характеристики в діапазоні від 275 ГГц до 450 ГГц. І електронний, і оптоелектронний підходи продемонстрували швидкість передачі даних до 100 Гбіт/с, хоча відстань зв'язку в більшості випадків становить менше двох метрів.

Таблиця 3.5 - Зведення характеристик сучасного каналу ТГц-діапазону

Технологія	Частота (ТГц)	Швидкість (Гбіт/с)	Відстань (м)	Потужність Тх (дБ)	Модуляція
GaAs mHEMT	300	64	1	-4	QPSK
INP HEMT	300	20	0.8	+3	ASK
CMOS	300	56	0.05	-5.5	16QAM
CMOS	300	105	-	-5.5	32QAM
CMOS	300	20	0.1	-	16QAM
InP-HEMT	300	100	2.22	-	16QAM
InP-HEMT	300	120	9.8	-	16QAM
InGaAs	300	60	0.5	-7	16QAM
Optoelectronic	280	100	0.5	-10	16QAM
Optoelectronic	300	10	0.3	-20	OOK
Optoelectronic	300	100	0.5	-16.1	16QAM
Optoelectronic	300	100	15	-8	32QAM
Optoelectronic	330	50	1	-10.5	ASK
Optoelectronic	350	100	2	-12	16QAM
Optoelectronic	350	100	2	+14	16QAM
Optoelectronic	385	32	0.5	-12	QPSK
Optoelectronic	400	60	0.5	-17	QPSK
Optoelectronic	400	60	0.5	-21	QPSK
Optoelectronic	450	132	1.8	+16	64QAM
Optoelectronic	350-475	120	0.5	-15	QPSK
Optoelectronic	400	106	0.5	-	QPSK
Optoelectronic	400	160	0.5	-17.5	QPSK

У статті [35] продемонстровано систему, що використовує технологію InP - НЕМТ, яка забезпечує швидкість передачі даних до 120 Гбіт / с на відстані 9,8 м. Також була створена оптоелектронна система, що складається з передавача на фотонному діоді з одностороннім рухом носія (unitraveling- carrier photodiode, UTC-PD) та активного електронного приймача на основі технології InGaAs НЕМТ, яка, як повідомляється, здатна забезпечувати швидкість передачі даних до 100 Гбіт/с на відстані 15 м.

3.2.2 ТГц-візуалізація та сенсорні системи

Терагерцова частина спектра може знайти широке застосування в галузі візуалізації та сканування, включаючи визначення характеристик матеріалів, біомедичну візуалізацію та біохімічне сканування. У ТГц-спектроскопії застосовується характерна реакція зразка на освітлення ТГц-випромінюванням, що дозволяє використовувати його визначення характеристик матеріалу і сканування предметів з метою безпеки. Завдяки більш короткій довжині хвилі відображені сигнали можна використовувати для розпізнавання жестів із підвищеною точністю. Технологія побудови зображень у ближньому полі в ТГц-діапазоні може подолати фундаментальну дифракційну межу та надати зображення надвисокої роздільної здатності, що відкриває великі перспективи для медичних застосувань, таких як візуалізація біомолекул.

Спектроскопічну візуалізацію в ТГц-діапазоні можна розділити на спектроскопію в часовій області (time-domain spectroscopy, TDS) і безперервну спектроскопію хвилі (continuous wave spectroscopy, CWS). У TDS генерується імпульс ТГц-діапазону, який спрямовується на зразок матеріалу. Передані або відображені сигнали збираються і потім перетворюються на частотну область. Цей записаний спектр містить унікальний відбиток зразка, який можна використовувати для визначення властивостей матеріалу, з якого складається зразок. Для генерації широкопasmового ТГц-сигналу можна використовувати лінзову фотопровідну антену (яку ми опишемо пізніше). Система TDS зазвичай

є громіздкою, оскільки містить допоміжні оптичні компоненти. CWS працює за аналогічним принципом, але замість генерації широкосмугового імпульсу установка CWS генерує вузькосмуговий спектр для досягнення високочастотної роздільної здатності. Електронна платформа на основі кремнію може запропонувати компактне рішення для реалізації спектроскопії у нижчому ТГц-діапазоні. Враховуючи багатодіапазонний (шість гармонік 160 ГГц) набір мікросхем візуалізації, що працює в діапазоні від 160 до 1000 ГГц з використанням 250-нм процесу SiGe HBT та з розвитком технології III-V/кремнію очікуються додаткові покращення параметрів обладнання спектроскопії.

Радіолокаційна візуалізація в ТГц-діапазоні використовує принцип радарного далекоміра і може забезпечити високу роздільну здатність/якість зображення. Попит на радарні датчики в автомобільних системах, охороні здоров'я, мобільних пристроях та інших додатках останнім часом суттєво збільшився – перспективним кандидатом для задоволення таких вимог є кремнієва платформа. Визначено, що однокристальний радіолокаційний модуль з частотною модуляцією безперервної хвилі (frequency modulated continuous wave, FMCW), що працює на частотах 210-270 ГГц з використанням 130-нм технології SiGe HBT, зміг досягти просторової роздільної здатності 2,57 мм.

Технологія NFI (сканування в ближньому полі) може створювати зображення з надвисокою роздільною здатністю в мікрометровому або навіть нанометровому діапазоні. Зазвичай формування зображень у ближньому полі ТГц-діапазоні виконується за допомогою скануючої оптичної мікроскопії. Хоча роздільна здатність може досягати нанометрового діапазону, система зазвичай громіздка і її важко інтегрувати. Тому для отримання зображень ближнього поля розглядають вбудований кристал кристал SRR. Наприклад, система формування зображення ближнього поля з використанням 130-нм технології SiGe була описана [9], де датчик SRR застосовувався для зчитування потужності ближнього поля (на відстані декількох мкм), а потім сигнал подавався на

вимірювальну схему. Повідомлялося про досягнення просторової роздільної здатності 10-12 мкм на частоті 550 ГГц.

3.3 Особливості впровадження систем бездротового зв'язку

Системи бездротового зв'язку як у міліметровому, так і в ТГц-діапазонах зазнають великих втрат у тракті передачі, хоча вони більш значні у терагерцевому спектрі. Наприклад, втрати на трасі довжиною 10 м на 28 ГГц становлять 81 дБ, але збільшуються до 101 дБ на 280 ГГц. Для компенсації високих втрат на трасі зазвичай використовуються високонаправлені решітки антени. Щоб генерувати високоспрямований промінь, рівнофазна поверхня променів, що передаються, від усіх антенних елементів повинна бути перпендикулярна напрямку поширення хвилі. У більшості випадків для компенсації фазових затримок, викликаних рознесенням різних антенних елементів на певні відстані (зазвичай половину довжини хвилі), необхідні аналогові фазообертачі. Фактичний фазовий зсув переважно залежить від несучої частоти. Це стає проблемою у широкосмуговій системі, де використовуються кілька несучих, які охоплюють широкий частотний діапазон. Результуючий промінь може розсіюватися із зміною частоти, що призводить до втрати підсилення решітки – ефекту, відомого як перекиє променя у міліметрових хвилях. У ТГц-системах цей ефект стає більш серйозним, тому що смуга пропускання ще ширша, а ширина променя надзвичайно мала (такі промені відомі як «голкові» або «олівцеві» промені). Згенеровані промені можуть при зміні частоти відхилятися у різних напрямках, що призводить до ще більш серйозних втрат підсилення у ґратах. Щоб відрізнити ефект ТГц-системах від ефекту в системах міліметрового діапазону, цей ефект в ТГц-системах називається розщепленням променя. Нещодавно [8] для пом'якшення небажаного ефекту запропонували використовувати метаповерхні. Багатообіцяючі результати відкрили новий шлях до проектування нескладних систем зв'язку з покращеними характеристиками променя.

Хоча технологія III–V/кремнієвих напівпровідників продемонструвала придатність до створення масштабованої та недорогої платформи для систем формування зображень та зв'язку у ТГц-діапазоні, кілька ключових проблем залишаються невирішеними. Перша проблема пов'язана з широкосмуговими спектральними характеристиками матеріалу та обмеженим діапазоном перебудови напівпровідникових джерел, в результаті чого робочий діапазон джерела ТГц-сигналу може виявитися недостатнім для покриття спектрального спектру сканованого матеріалу. Тому для спектроскопічної візуалізації необхідні джерела ТГц-випромінювання, які можна налаштовувати у широкому діапазоні. Останні роботи показали помітний прогрес; наприклад, [2] повідомляється про джерело ТГц-діапазону з широким діапазоном перебудови (0,04-0,99 ТГц). Крім того, для отримання зображень в ТГц-діапазоні потрібні джерела, що настроюються, з відповідними можливостями формування променя, щоб уникнути громіздкості, властивій системам механічного сканування. Потрібна компактна інтеграція джерел, що реконфігуруються, з великими антенними ґратами ТГц-діапазону, і очікується, що ці джерела спростять реалізацію передових алгоритмів побудови зображення, таких як стислі вибірки.

3.4 Висновки до розділу 3

Розглянуто досягнення технології напівпровідників типу III-V/кремній, які дозволили виконувати гетерогенну інтеграцію різних високопродуктивних компонентів, таких як електронні, фотонні, магнітні та графенові компоненти. В результаті, визначено, що для забезпечення оптимальних характеристик необхідна комплексна платформа, яка була б одночасно компактною та дуже різномірною, а також вбирала б у себе всі згадані компоненти. Більше того, останні досягнення в галузі плазмонних технологій відкрили обнадійливі перспективи інтеграції плазмонних компонентів на кристал кремнію. Очікується, що у майбутньому роботу буде продовжено, незважаючи на складний характер цієї галузі, з метою подальшого розвитку технології

перенесення плазмонних компонентів на кремній до комерційного рівня. Отже, оптимізована інтеграція цих гетерогенних компонентів на одній кремнієвій пластині може призвести до створення електронно-фотонної/плазмонної системи, здатної забезпечити високу продуктивність поряд з оптимальним балансом між вартістю, ефективністю та програмованістю, – системи для наступного покоління комерційних та промислових ТГц-пристроїв.

4 ІННОВАЦІЙНІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ СИСТЕМ 6G

Бездротові технології вплинули на суспільство. Сьогодні більшість людей вважають мобільні пристрої невід'ємною частиною повсякденного життя. Смартфони, що повністю замінили свого попередника, скромний функціональний телефон, більше не просто річ, яку приємно мати; швидше, це життєва потреба. Революція в області смартфонів почалася з концепції використання бездротових комп'ютерів для доступу в інтернет через послуги мобільного широкосмугового доступу. На сьогоднішній день, коли мобільні програми та сервісна модель OTT поширилися майже повсюдно, ми стали свідками бурхливого зростання використання мобільних додатків. Зараз нам доступний великий набір програм практично для всього: календар, камера, калькулятор, навігатор, карта, гаманець, новини та громадський транспорт – це лише деякі з них. Інші програми можуть рекомендувати ресторани, торгові центри, паркування та онлайн-класи. У цьому розділі ми обговоримо тенденції розвитку мобільних пристроїв та інтерфейсів між людьми та пристроями.

4.1 Мобільні пристрої майбутнього

Передбачається, що наступна революція мобільних пристроїв – точно так, як смартфони замінили звичайні телефони, – відбудеться протягом терміну служби 6G. Очікується, що до 2030 року майбутні пристрої отримають нові можливості, що забезпечуються системою зв'язку 6G, – сканування та побудова образів навколишнього середовища, тактильний зв'язок, голографічний дисплей, штучний інтелект та інші функції.

Ці інноваційні можливості радикально змінюють не лише конструкцію, а й роль мобільних пристроїв у нашому житті. У міру подальшого розвитку мобільні пристрої отримають такі можливості:

- сприйняття на рівні людини (наприклад, необмежена смуга пропускання для візуального/звукового сприйняття на рівні людини та реалістичного спілкування між людьми [1]);
- сканування навколишнього середовища (наприклад, можливість отримання мультиспектральних зображень з близької відстані [2] та високоточного позиціонування);
- взаємодія людини і кіберпростору (наприклад, голографічні дисплеї, що носяться, для взаємодії людини з кіберміром [3]);
- збирання енергії (наприклад, бездротова зарядка та одночасна бездротова передача інформації та енергії).

Нові можливості перетворюють нинішній світ «інтелектуальних помічників» на світ «кіберфізичного злиття», як показано на рис. 4.1.

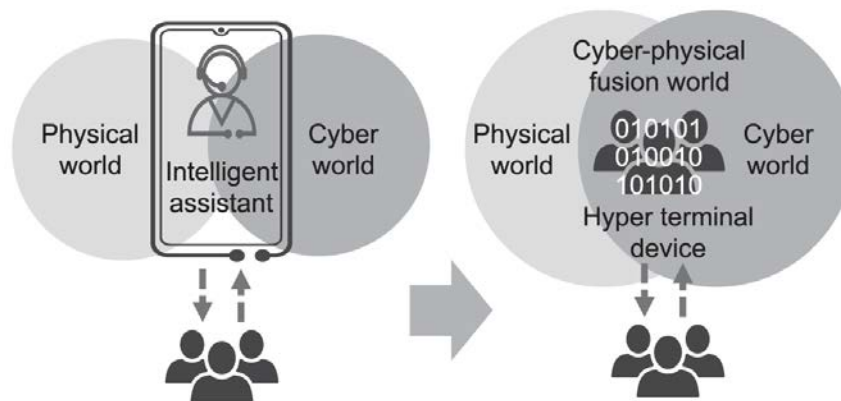


Рисунок 4.1 - Еволюція від інтелектуального помічника до «цифрового Я», яке є віртуальним уявленням кінцевого користувача чи пристрою

Сучасні смартфони діють як шлюзи, що з'єднують фізичний світ із кіберсвітом, переважно забезпечуючи доступ до інтернету. Ми очікуємо, що в майбутньому мобільні бездротові пристрої перетворяться на гіпертермінали, що носяться у світі кіберфізичного злиття – так зване «цифрове Я». Ці пристрої будуть перевершувати людські можливості по ряду напрямків, таких як інтелектуальне розпізнавання та сприйняття навколишнього середовища.

Враховуючи перераховані вище можливості, можна виділити чотири основні тенденції розробки мобільних пристроїв, як показано на рис. 4.2.

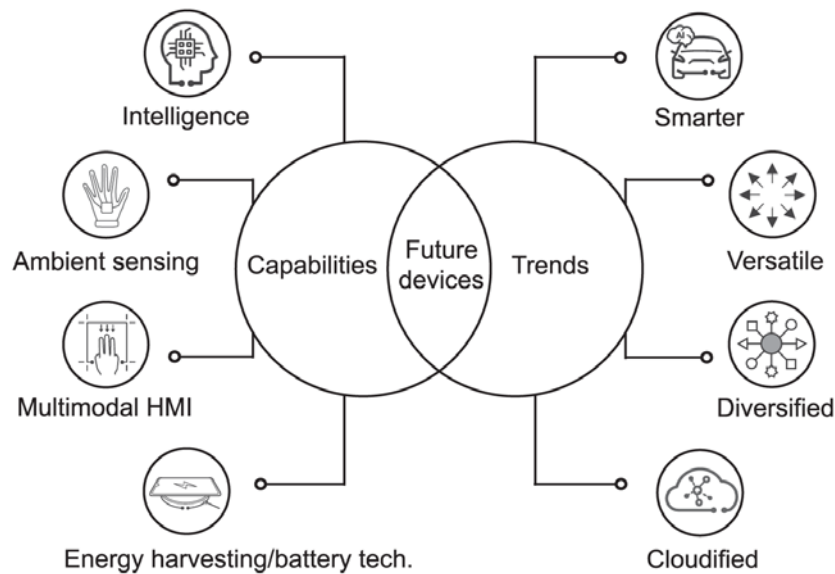


Рисунок 4.2 - Телекомунікаційні пристрої наступних поколінь

Отже, завдяки технологічним досягненням нові пристрої будуть: розумнішими – смартфони стануть не лише потужнішими, а й отримають опцію доповненої реальності для автоматизації навколишнього життя.

Сучасні смартфони не просто в мільйони разів потужніші за комп'ютери Національного керування з авіонавтики та дослідження космічного простору (НАСА), які використовувалися під час місії «Аполлон-11» [4], – вони стають все розумнішими в міру збільшення обчислювальних можливостей. Обчислювальна потужність донедавна зростала відповідно до закону Мура, що сприяло розвитку штучного інтелекту та машинного навчання в останні роки. Крім того, успіхи, досягнуті у виробництві напівпровідників, відкривають шлях до більш високої обчислювальної продуктивності, кращої енергоефективності, меншого розміру мікросхем та більш високої щільності транзисторів.

Чим потужнішими стають смартфони, тим краще вони можуть реалізувати можливості штучного інтелекту. Сьогодні все більше смартфонів оснащується спеціалізованими вбудованими модулями нейронної обробки для обчислень зі

штучним інтелектом. Алгоритми машинного навчання можуть використовуватися для виконання безлічі обчислювально-ресурсоємних завдань, таких як доповнена реальність, розпізнавання осіб та розпізнавання голосу та мовлення. Для розробки інноваційних програм створено численні API-інтерфейси ІІІ, такі як HiAI від Huawei, Caffe2Go від Facebook, TensorFlow Lite від Google та CoreML від Apple.

У той же час ресурсомісткі завдання можуть бути перенесені з мобільних пристроїв до граничних хмар; цей підхід відомий як парадигма граничних обчислень (edge computing). Граничні обчислення потребують надвисокої швидкості передачі даних, наднизкої затримки та надвисокої надійності, які забезпечать бездротові мережі наступного покоління. У майбутньому пристрої стануть більш інтелектуальними, а також забезпечать захист конфіденційності за рахунок використання розподілених обчислень та навчання завдяки граничним обчисленням, хмарним обчисленням, а також потужним локальним процесорам, графічним процесорам та спеціалізованому обладнанню для прискорення ІІІ.

Досягнення технологій зв'язку малого радіусу дії та алгоритмів штучного інтелекту дозволили групам дронів, транспортних засобів та роботів локально взаємодіяти один з одним та з навколишнім середовищем. Подібні групи пристроїв можуть досягати своїх цілей, використовуючи децентралізоване та самоорганізоване керування (наприклад, інтелект роя та групову робототехніку). У міру розвитку технологій ближнього зв'язку 6G та алгоритмів штучного інтелекту / машинного навчання зростатиме інтелектуальна складова пристроїв, а якість обслуговування та продуктивність поліпшуватимуться за рахунок більшої автоматизації всіх аспектів нашого життя; універсальніше – не лише підключеність, а й нові можливості виявлення, що відкривають перспективи нових застосувань.

У майбутньому підтримка бездротового зв'язку стане фундаментальною функцією будь-якого пристрою, оскільки вона буде необхідна для кожної людини, будинку, організації та галузі. Мережа 6G може досягати пропускної спроможності в діапазоні Тбіт/с, забезпечуючи при цьому затримку передачі

менше 1 мс. Це підтримує плавний обмін мультисенсорною інформацією VR, включаючи відео з високою реалістичністю, аудіо та навіть тактильні відчуття. Завдяки мультисенсорним можливостям у майбутньому можуть бути інтегровані з людським тілом, наприклад для усунення наслідків інвалідності. Взаємне поєднання людського тіла може сприяти розвитку людства, формуючи кібернетичні організми.

Крім зв'язку, нові можливості сканування будуть підтримуватись об'єднаними технологіями зв'язку та сканування (рис. 4.3). Завдяки цьому мобільні пристрої майбутнього зможуть підтримувати багато нових функцій. Наприклад, радіозв'язок у ТГц-діапазоні може використовуватися для візуалізації та спектроскопії, надаючи нам персональні «рентгенівські знімки» на молекулярному рівні. Крім того, моніторинг стану здоров'я (серцебиття, падіння тощо), порушення кордонів переміщення та розпізнавання жестів за допомогою безконтактної взаємодії з пристроями також можуть бути реалізовані за допомогою бездротового сканування та машинного навчання.

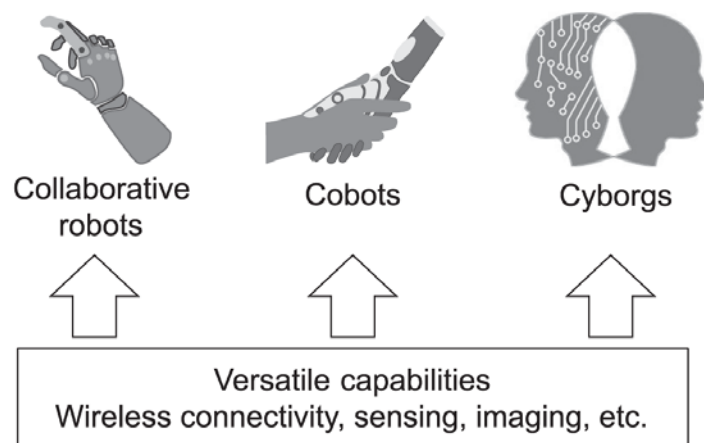


Рисунок 4.3 - Різноманітні можливості майбутніх пристроїв 6G

Більше того, взаємодія між людьми та машинами, а також між фізичним світом та кіберсвітом стане ще багатшою. Наприклад, системи тактильних датчиків і виконавчих механізмів включатимуть віртуальну реальність, щоб надати користувачам більше підказок для ментальної побудови віртуального

світу за межами просторових і тимчасових обмежень, а обладнання, кероване віддалено за допомогою мозкових хвиль, значно розширить сферу особистої діяльності. Підтримка природних людських зв'язків (Human Bond Communication, HBC) спрямована на покращення комунікативного досвіду людей за рахунок включення п'яти сенсорних функцій. Це дозволить обмінюватися більш виразною та цілісною сенсорною інформацією за рахунок використання високонадійних, оперативних та інтелектуальних засобів зв'язку.

Для втілення цих можливостей необхідно значно продовжити термін служби батареї. Завдяки масовому використанню нових матеріалів та архітектури батарей (наприклад, графен, літій-фосфат заліза та полімерні батареї) людям із вбудованими пристроями не потрібно буде щодня заряджати батареї за допомогою дротових зарядних пристроїв. Натомість будуть доступні різні технології збирання енергії, включаючи бездротову передачу енергії, яка може ефективно та безпечно заряджати мобільні пристрої на великих відстанях (наприклад, через кімнату); різноманітніше – будуть підключені не тільки смартфони, але й різні пристрої, що виконують функції датчиків і виконавчих механізмів.

Сьогодні смартфони є домінуючим мобільним пристроєм серед індивідуальних споживачів послуг мобільного зв'язку. У глобальному масштабі частка людей, які використовують смартфони, за прогнозами, перевищить 80% до 2025 [5]. У той же час технології бездротових пристроїв продовжують розвиватися, оскільки бездротові мережі прагнуть запропонувати більш високу швидкість, меншу затримку та більшу надійність. Крім того, відбувається зсув парадигми від переважного обслуговування індивідуальних клієнтів до обслуговування як індивідуальних, так і різноманітних вертикальних/галузових клієнтів.

Розумні пристрої, такі як смартфони, планшети, ноутбуки і навіть розумні автомобілі, стають невід'ємною частиною нашого життя завдяки досягненням у галузі напівпровідникових технологій та програмних платформ. У майбутньому з'явиться широкий спектр орієнтованих на людину та промислових пристроїв,

що поєднують передові датчики, нові технології візуалізації та штучний інтелект (рис. 4.4).

- Пристрої, орієнтовані на людину: ми прогнозуємо розвиток пристроїв, що носяться (гарнітури VR, окуляри AR, розумний годинник і роботи-екзоскелети), імплантованих медичних пристроїв і т.д.

- Промислові пристрої: до мереж 6G будуть підключені автомобілі, роботи/коботи та інтелектуальне виробниче обладнання; всюди буде розкидана велика кількість недорогих, малопотужних (або навіть безбатарейних, званих «пасивними») пристроїв IoT, які обслуговують розумне місто та будинок, розумну охорону здоров'я, моніторинг забруднень, відстеження переміщень та інші додатки.

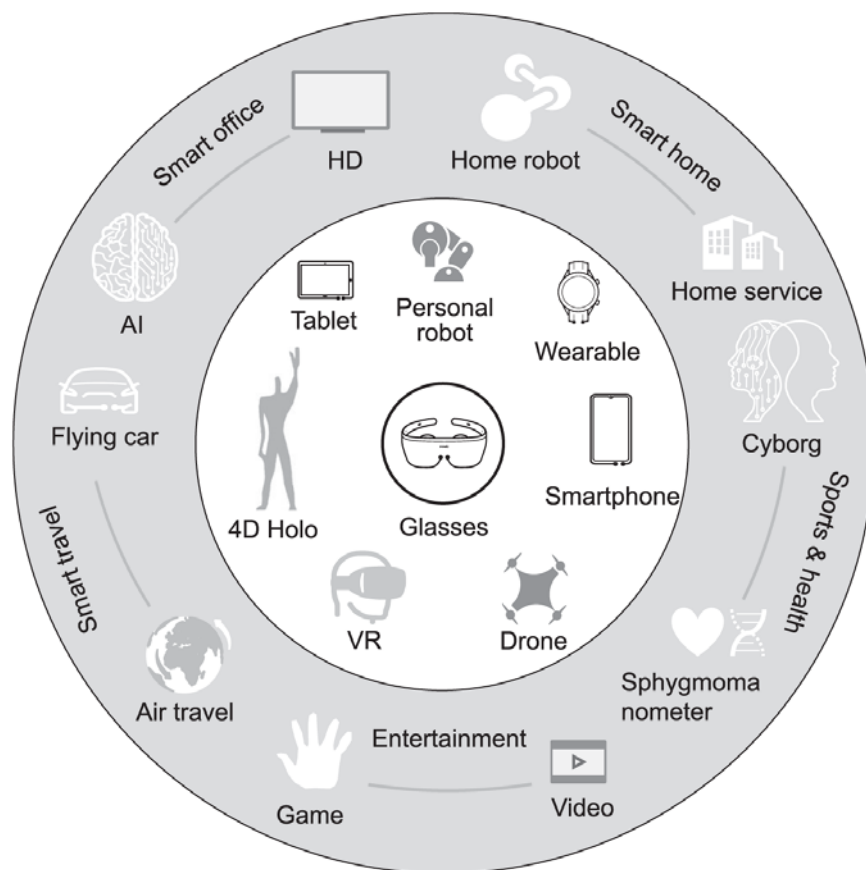


Рисунок 4.4 - Приклад орієнтованих на людину додатків та різноманітних пристроїв

Ці пристрої будуть служити датчиками та виконавчими механізмами кіберфізичної системи, поєднуючи обчислення, мережеві та фізичні процеси.

У зв'язку зі стрімким зростанням кількості різноманітних пристроїв вимоги до взаємопов'язаності будуть значно вищими. Наприклад, смартфони автоматично підключатимуться до телевізорів для покращеного перегляду відео, а пристрої, що носяться, підключатимуться до смартфонів для передачі зібраної інформації. Але який пристрій буде служити в майбутньому як якірний пристрій? Такий якірний пристрій повинен мати надійний бездротовий зв'язок, тривалий час автономної роботи та обчислювальні ресурси; хороші кандидати – смартфони, гарнітури VR, роботи-екзоскелети та розумні автомобілі. Завдяки мережі 6G якірні пристрої та підключені до них пристрої забезпечать безперебійну та узгоджену роботу на користь споживачів; розподіленіше – споживачам будуть служити не лише фізичні, а й віртуальні пристрої, які забезпечують захист конфіденційності та нові бізнес-моделі.

У міру розвитку технології хмарних обчислень та ІоЕ та завдяки можливості підключення 6G все більше фізичних пристроїв 6G матимуть віртуального двійника у хмарі (рис. 4.5). Завдяки децентралізації персональні дані користувачів можуть зберігатися на віртуальних пристроях під контролем користувачів, а не на мобільних пристроях або в централізованих сховищах, що належать третій стороні, що позбавляє користувачів від побоювань з приводу потенційних проблем з конфіденційністю. На основі концепції віртуалізованих пристроїв з'являться загальні пристрої 6G, які зазвичай знаходяться у громадських місцях та використовуються на запит. Завдяки інтеграції біометрії, штучного інтелекту, персоналізованого автоматичного налаштування та технологій захисту конфіденційності пристрою 6G зможуть надавати прості у використанні функції, такі як біометрична автентифікація та гіперперсоналізовані конфігурації. Це дозволить кінцевим користувачам отримувати доступ до бажаних послуг у будь-який час та в будь-якому місці через спільні пристрої. Перелік типів загальних пристроїв 6G буде досить великим, включаючи автомобілі, що оренднуються, конференц-зали, хмарні

пристрої та будь-які інші пристрої з можливостями вводу/виводу та обчислювальними можливостями, які можна використовувати спільно або орендувати в громадських місцях.



Рисунок 4.5 – Схема віртуального телекомунікаційного пристрою

Крім того, деякі пристрої 6G підтримуватимуть хмарні обчислення. Клієнти зможуть придбати пристрої 6G з підтримкою приватних хмарних обчислень – такі пристрої допоможуть клієнтам задовольнити більш високі вимоги до обчислювальних сховищ для більш інтелектуальної голосової підтримки, зберігання особистих зображень та відео тощо. Ці пристрої можуть взаємодіяти з загальнодоступними хмарними сервісами через з'єднання 6G для підтримки розширеної функціональності. Крім того, завдяки наявності віртуальних двійників фізичні пристрої зможуть переносити ресурсомісткі обчислювальні завдання в хмару, продовжуючи тим самим термін служби батареї і уникаючи проблем з перегрівом.

4.2 Інтерфейс пристроїв майбутнього

Концепція інтерфейсу мозок-комп'ютер (brain-computer interface, BCI) походить від 1970-х років, коли Жак Відаль спробував створити систематичний підхід до комунікації між людиною та комп'ютером [6, 7]. Спочатку дослідники прагнули використовувати BCI для діагностики неврологічних розладів та захворювань головного мозку (наприклад, для контролю епілептичних нападів). Система записувала і обробляла сигнали електроенцефалографії (ЕЕГ) шкіри

голови і витягувала з даних особливості для діагностики епілепсії. У 2004 році у статті [8] було продемонстровано систему ВСІ, яка може контролювати багатовимірні рухи з використанням неінвазивного підходу. Цей прорив викликав величезний інтерес до досліджень ВСІ у наукових та промислових колах. Як показано на рис. 4.6 принаймні типова система ВСІ складається з наступних компонентів: обробка сигналів, виділення ознак, класифікація або розпізнавання образів для перетворення даних на машинні команди та інтерфейси додатків (наприклад, комп'ютери або роботизовані маніпулятори). Інтерфейси програм, нарешті, будуть передавати сенсорну інформацію назад користувачу, утворюючи двосторонній зв'язок.

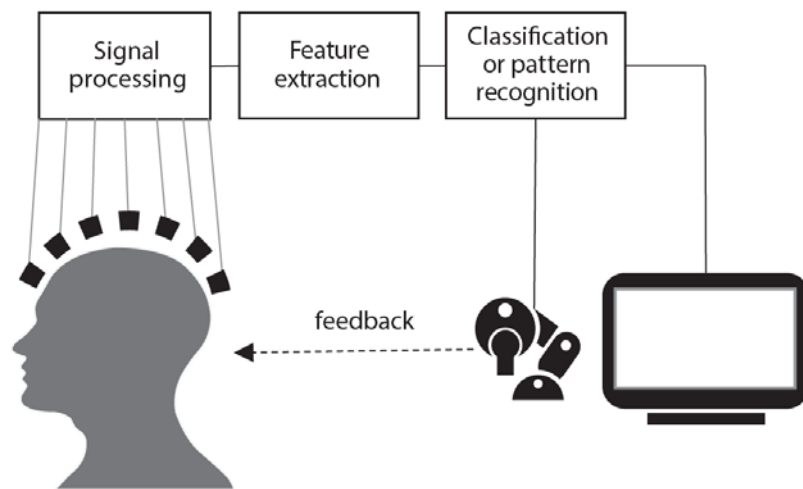


Рисунок 4.6 – Схема системи ВСІ

В останні десятиліття технологія ВСІ еволюціонувала настільки, щоб втілити в життя досягнення, які колись вважалися науковою фантастикою. Наприклад, [9] було показано, що нейропротез може сприяти відновленню рухової активності після травми хребта. Після вживлення електродів у мозок паралізований пацієнт може керувати роботизованим протезом за допомогою свого розуму. Більше того, телекінез (переміщення предметів силою думки) колись вважався надприродним явищем, але тепер у певному сенсі він можливий. Наприклад, у статті [10] показано, що ми можемо керувати польотом

дрону за допомогою мозкових хвиль. Нещодавно в [11] було продемонстровано, що за допомогою нейрочіпів, імплантованих в мозок тварини, можна точно передбачити рухи його суглобів. Це відкриває цілу низку можливостей для лікування сліпоти, паралічу, психічних захворювань тощо.

Для реєстрації активності мозку використовувалися як інвазивні, і неінвазивні методи. У другому випадку використовуються електроди, що поміщаються на шкіру голови, у той час як у першому використовуються інтракортикальні та стереоелектроенцефалографічні (SEEG) електроди, розташовані над корою головного мозку. Інвазивний метод, порівняно з неінвазивним, забезпечує сигнали з більш високим просторово-тимчасовим дозволом та нижчим рівнем шуму. У цьому контексті показано, що нейрочіп розміром з монету, що містить тисячі електродів, може бути імплантований у мозок тварини для збирання внутрішньокортикальних сигналів ЕЕГ. Хоч би як багатообіцяюче це звучало, поки існують досить серйозні перешкоди для широкого використання цієї технології серед людей.

Крім того, розвитку технології ВСІ також сприяли досягнення у галузі глибокого навчання. Зазвичай локалізація джерела ЕЕГ (зворотне завдання) вирішувалася шляхом ітеративного обчислення прямої задачі ЕЕГ доти, доки модельовані сигнали ЕЕГ не збігалися з вимірами в межах бажаних рівнів допуску. Глибоке навчання ефективніше вирішує зворотне завдання з допомогою використання великої кількості доступних даних [12, 13].

Крім пасивного зчитування сигналів мозку, двонаправлений зв'язок ВСІ може забезпечувати сенсорний зворотний зв'язок від контрольованого об'єкта (наприклад, протеза кінцівки). Дослідження у цьому напрямку показали, що соматосенсорний зворотний зв'язок може бути забезпечений за допомогою електричної стимуляції периферичних та/або кіркових нервів пацієнтів [14, 15]. Кіркова стимуляція включає стимуляцію певних соматосенсорних областей кори головного мозку, які пов'язані з певними сенсорними функціями та частинами тіла. Ці області зазвичай локалізовані, і точної стимуляції потрібні електроди мікроскопічних розмірів. Крім того, зворотний зв'язок у реальному

часі необхідний для моделювання природної біомеханіки, опосередкованої центральною нервовою системою. В даному контексті критично значущою стає швидкість з'єднання (тобто пропускна здатність каналу для обміну даними між мозком та машиною). Зроблено ще один крок уперед і визначено, що надщільний чіп з мікроелектродною матрицею може записувати сигнали в головному мозку гризунів. Розмір упакованого нейрочіпа становить менше $23 \times 18,5 \times 2$ мм, і повідомляється, що він здатний підтримувати багатоканальну стимуляцію з метою нейронної модуляції, хоча це ще доведеться продемонструвати. Очікується, що нейрочіпи, що імплантуються, з новими нейронними сенсорами сприятимуть подальшому розвитку цього напрямку досліджень [17].

Периферійна стимуляція пов'язана з концепцією кіборга, яка відома з науково-фантастичних фільмів, де організм людини покращують, додаючи в нього роботизовані компоненти. Останні досягнення у біоніці показали, що ера кіборгів має всі шанси стати реальністю. У перспективному майбутньому міоневральний інтерфейс агоніст-антагоніст (АМІ) дозволить передавати команди мозку кінцевому м'язі для динамічного контролю протеза і забезпечуватиме пропріоцептивний сенсорний зворотний зв'язок з мозком. Згідно з цією методикою, хірурги спочатку аналізують прямі та зворотні сигнали, пов'язані з групою м'язів у залишковій кінцівці пацієнта під час ампутації. Коли пацієнт здійснює рух, електроміографічні сигнали цільової групи м'язів записуються і згодом перетворюються на машинні команди для керування сервоприводами кінцівки, що протезується. І, навпаки, коли протезний суглоб рухається, генеруються відповідні сенсорні сигнали, які потім вирушають у мозок через нерви, дозволяючи пацієнтові відчувати рух. Інтерфейс АМІ був продемонстрований у виступі на TED [20], де протезована кінцівка допомагала пацієнтові бігати, лазити та танцювати. АМІ є багатообіцяючою основою, в рамках якої ми можемо об'єднати робототехніку та біологічних людей. Схоже, епоха людей-кіборгів не за горами.

Ми очікуємо, що в найближчі кілька десятиліть нейронні протези, керовані мозком, стануть реальністю та покращать якість життя паралізованих пацієнтів

та пацієнтів з обмеженими можливостями. Керуючи роботизованими протезами за допомогою людського розуму, пацієнти зможуть ходити, переміщати предмети та виконувати інші дії, пов'язані з кінцівками.

4.3 Нові мобільні пристрої

Носимі пристрої за останні кілька років зазнали бурхливого зростання популярності завдяки їх новим функціональним можливостям. Електронні датчики, що носять, можуть знімати різні фізіологічні параметри організму, наприклад частоту серцевих скорочень, електрокардіограму, температуру шкіри, рухи тіла і артеріальний тиск. Ці пристрої мають безліч застосувань, у тому числі у спорті, військовому обладнанні, охороні здоров'я та повсякденному житті. З появою 6G на сцені з'являться нові пристрої, що носять, що реалізують нові варіанти застосування.

Визначено, що тактильна рукавичка з плетеним масивом датчиків здатна визначати деякі форми об'єктів, оцінювати їх вагу і формувати тактильні патерни при захопленні предметів. У ході дослідження взаємодія руки з різними об'єктами реєструвалася за допомогою 548 датчиків, встановлених на тактильній рукавичці. Потім глибоку крутну нейромережу навчили витягувати тактильні сигнатури людського сприйняття. Ці сигнатури можуть бути дуже корисними при розробці роботів і протезів.

В [22] було продемонстровано широкосмуговий і гнучкий пристрій ТГц-візуалізації, що носить на основі плівки з карбонових нанотрубок при кімнатній температурі. Терагерцевий сканер на основі нанотрубок може виконувати пасивну візуалізацію як плоских, так і вигнутих зразків. Ця технологія полегшить використання зручних та портативних пристроїв ТГц-діапазону у багатьох сценаріях, включаючи перевірки безпеки та моніторинг стану здоров'я.

Для застосування в моніторингу стану здоров'я були продемонстровані пристрої на основі графену. Зокрема, показано, що графеновий фотодетектор,

сенсibilізований напівпровідниковими квантовими точками (GQD-PD), може застосовуватися при створенні гнучких і прозорих пристроїв, що носяться. Вже сьогодні на основі запропонованого фотодетектора GQD-PD можна розробити ряд прототипів, що діють. Наприклад, був показаний браслет з GQD-PD та вбудованим джерелом світла, що вимірює частоту серцевих скорочень як у режимах відображення, так і в режимах передачі. Автори [24] продемонстрували гнучкий та прозорий браслет, інтегрований з графеном та полі(3,4-етилендіокситіофен)-полі(4-стиролсульфонат) (PEDOT:PSS)/графеновим фотодетектором середнього інфрачервоного діапазону. Браслет можна використовуватиме спостереження за станом здоров'я, відстежуючи зміни молекулярного складу шкірних виділень тіла.

4.4 Обчислювальна техніка після закону Мура

Закон Мура протягом останніх кількох десятиліть успішно пророкував тенденції розвитку технологічної індустрії. Але тепер, з розвитком кремнієвої літографії та мініатюризації електроніки, очікується, що до 2025 року крива зростання стане більш плоскою [1]. У найближчій перспективі платформи на основі кремнію продовжуватимуть сприяти підвищенню продуктивності інтегральних схем та розширенню функціональності за рахунок гетерогенної інтеграції напівпровідників типу III–V, фотонних/плазмонних та інших передових матеріалів. Нові обчислювальні архітектури, такі як спеціалізовані обчислювальні системи, обладнання та оптимізовані алгоритми, допоможуть підвищити продуктивність обчислень з боку програмного забезпечення. У довгостроковій перспективі дві обчислювальні технології обіцяють зробити фундаментальний стрибок вперед із погляду обчислювальної продуктивності. Одна з них – це технології, що ґрунтуються на наслідуванні людського мозку, такі як нейроморфні обчислення та глибоке навчання, які дозволяють нам обробляти інформацію більш ефективно, як біологічний мозок. Інша – квантові

обчислення, що використовують переваги поліноміальної суперпозиційної природи кубітів; це може значно знизити обчислювальне навантаження.

У 1965 році Гордон Мур стверджував, що кількість транзисторів у тій чи іншій області обчислень подвоюватиметься кожні два роки [2]. У 1975 році його пророцтво підтвердилося, і ця тенденція зберігалася до середини 2000-х років. З тих пір крива зростання ставала все більш плоскою, і все більше зміцнювалася думка, що електронна галузь увійшла в епоху, коли закон Мура втратив свою силу.

За останні 50 років було досягнуто значного прогресу в зменшенні розмірів компонентів. Наприклад, довжина затвора польових транзисторів метал-оксид-напівпровідник (MOSFET) зменшилася з 10 мкм на початку 1970-х років до 5 нм сьогодні [2]. Після досягнення довжини затвора 50 нм польові транзистори розділилися на два різних сімейства: пласка повністю збіднена структура «кремній на ізоляторі» та тривимірна структура багатозатворного польового транзистора (FinFET). В даний час досягнення в галузі літографії в далекому (короткохвильовому) ультрафіолеті та безліч удосконалень у різних процесах призвели до появи транзисторів атомарного рівня. Покладатися виключно на закон Мура більше не можна; потрібні нові концепції пристроїв, архітектур та обчислювальних парадигм.

Пристрої на основі кремнію продовжать розвиватися протягом кількох наступних років. Наприклад, для реалізації вертикального нарощування напівпровідникових структур були розроблені багатошарові інтегральні схеми, а гетерогенна інтеграція кремнію з напівпровідниками типу III–V та іншими функціональними матеріалами продовжить підвищувати швидкодію та ефективність електронних компонентів. Крім того, кремнієва фотоніка – інтеграція фотонних компонентів на кремнієвому чіпі – розширить функціональність пристроїв у фотонній області. Зусилля у цих напрямках ще довго приносять свої плоди у міру розвитку нанотехнологій, ефективного керування енергоспоживанням та вдосконаленого проектування схем.

Масове виробництво 7-нм FinFET-транзисторів почалося в 2018 році, а межа 5 нм була досягнута тільки двома роками пізніше, в 2020 році. Хоча зменшення розміру на перший погляд не здається значним з 7 нм до 5 нм, насправді це скорочення на 30%, що дуже суттєво. Наслідуючи цю тенденцію, ми можемо розраховувати на створення транзисторів атомарного рівня до 2022–2024 років. В атомарному масштабі почнуть переважати квантові ефекти, що дозволить нам реалізувати нові методи, які неможливо використовувати сьогодні, і зробить традиційну схемну логіку застарілою. Очікується, що до 2030 технологія 2 нм буде готова до випуску першої партії пристроїв 6G. Довгострокова дорожня карта розвитку технології напівпровідникових чипів має вирішальне значення для успішної комерціалізації 6G.

У довгостроковій перспективі необхідні фундаментальні успіхи в досягненні високої енергоефективності маніпулювання інформацією у всіх контекстах. Щоб досягти зміни парадигми у світі обчислень, необхідні технології, які можуть подолати обмеження CMOS. Історичний досвід розвитку транзисторів показує, що потрібно близько 10 років, щоб новації на рівні фундаментальної фізики досягли масового застосування. Очікується, що протягом наступних двох десятиліть дослідження принесуть свої плоди, кульмінацією яких стануть радикальні вдосконалення в процесах створення мікросхем, нова обчислювальна парадигма і пов'язані з ними практичні застосування.

Заслужують на увагу й економічні міркування. Очікується, що інвестиції в серійне виробництво нових кремнієвих чипів для технології 5 нм становитимуть 12 мільярдів доларів США. Кількість постачальників, які можуть побудувати такі об'єкти та мають досвід їх експлуатації, є надзвичайно малою. Одноразові витрати на розробку спеціалізованих інтегральних схем (ASIC) у цих процесах становлять десятки мільйонів доларів, а це означає, що нові виробничі процеси мають економічний сенс тільки для тих, хто має дуже великі обсяги.

4.5 Нейроморфні розрахунки

З появою ШІ обчислювальні технології, що імітують функції мозку (наприклад, нейронні мережі та машинне навчання), зробили революцію у комп'ютерній індустрії. ШІ маніпулює даними так само, як біологічний мозок, і може виконувати самонавчання, щоб розпізнавати приховані закономірності у великих обсягах даних. Спочатку ШІ був розроблений для виконання деяких базових функцій, таких як розпізнавання мови та обробка зображень, але з того часу він досяг значного прогресу і здатний виконувати набагато складніші функції, такі як гра в шахи, твор музики і навіть написання статей.

Хоча нещодавній прогрес у галузі ШІ дозволив нам автоматизувати обробку даних, нам все ще потрібна обчислювальна платформа, яка може обробляти інформацію як людський мозок, щоб реалізувати справжній машинний інтелект. Людський мозок складається з мільярдів нейронів, пов'язаних трильйонами синапсів у тривимірному просторі. Передача інформації між нейронами супроводжується дуже низькими енерговитратами. Що стосується нейронної мережі її взаємозалежний характер дозволяє їй обробляти кілька інформаційних потоків паралельно. Це дозволяє виконувати обчислення набагато швидше, споживаючи дуже мало енергії. Тому для створення інтелектуально потужних і водночас енергоефективних машинних ресурсів бажано мати обчислювальну модель, що імітує мозок.

З обчислювальної точки зору алгоритм глибокого навчання імітує обробку інформації людським мозком. Використовуючи величезний обсяг доступних даних, такий алгоритм навчається, витягуючи високорівневі ознаки вихідних даних за допомогою багаторівневої мережі, яка імітує передачу сигналів нейронного збудження. Кожен шар навчається витягувати все більш абстрактні та репрезентативні ознаки з попереднього шару і відправляє ці ознаки до наступного шару для більш точного вилучення. Зрештою, вихідні дані розпізнаються лише на рівні вихідного шару.

Ранні апаратні реалізації нейроморфних обчислень використовували схеми на польових транзисторах для імітації активності нейронів та синапсів [3]. Це спричинило появу «нейроморфних» кремнієвих нейронів (silicon neurons, SiN), заснованих на технології надвеликої інтеграції (very large scale integration, VLSI). Згодом було запропоновано безліч типів SiN для імітації реальних нейронів з різним ступенем складності [4]. У цій статті представлений широкий спектр схем, які зазвичай використовуються для проектування SiN. Наприклад, синаптична передача може бути математично змодельована за допомогою простого диференціального рівняння першого порядку. Для реалізації такої функції можна використовувати схему інтегрування в часі. Проте реалізувати систему, що забезпечує великі з'єднання з урахуванням цієї схеми, складно, оскільки вона громіздка.

Для підвищення ступеня відповідності нейроморфних алгоритмів природі мозку та досягнення вищої обчислювальної ефективності було запропоновано цифрові реалізації моделі мозку на програмованих вентильних матрицях (programmable gate arrays, FPGA) або ASIC. Для поліпшення обробки даних у нейроморфних обчислювальних системах застосовують оптимізовані інтерфейси пам'яті, такі як інтерфейси пам'яті, що реконфігуруються, і пам'ять з високою пропускнуою здатністю.

Останнім часом велику увагу дослідників привертає енергонезалежна пам'ять, оскільки забезпечує альтернативні способи зберігання даних [5]. Одним із прикладів такого пристрою є мемристор, який записує історичний профіль збуджень – це унікальна здатність. Мемристор, електронний еквівалент біологічної пам'яті, простіше кажучи, може відкрити новий вимір в обробці даних щодо нейроморфних обчислень. Наприклад, він дозволяє записувати пошуки історичних даних і ефективніше застосовувати їх у наступних пошуках, допомагаючи нейронним мережам глибокого навчання виконувати завдання більш «осмислено».

Нейроморфні обчислення імітують обробку інформації на біологічному рівні та функціонують на компактній та енергоефективній платформі. Ця

технологія, натхненна мозком, є перспективним претендентом на досягнення рівня справжнього машинного інтелекту, і вона продовжуватиме розвиватися зі зростанням ринку штучного інтелекту.

4.6 Квантові розрахунки

Квантові обчислення – це нова обчислювальна парадигма. На відміну від звичних бінарних операцій на звичайному комп'ютері, квантовий комп'ютер обробляє інформацію з урахуванням явищ квантової механіки. Для представлення інформації в квантовій механіці використовуються квантові біти, які називаються кубітами, які є фундаментальною обчислювальною одиницею в квантовому комп'ютері. У порівнянні з дискретною природою двійкових бітів, кубіти можуть приймати когерентні стани від 0 до 1 на безперервній сфері – так званій сфері Блоха. Використовуючи переваги концепції суперпозиції, кубіти можуть одночасно надавати інформацію про 2^n (де n – кількість кубітів) станів. Оскільки кубіт по суті є поліноміальною суперпозицією декількох станів одночасно, квантовий комп'ютер може обробляти всі 2^n станів паралельно, що призводить до значного збільшення швидкості обчислень.

За останнє десятиліття було розроблено безліч квантових алгоритмів для демонстрації можливостей як квантових, так і традиційних обчислювальних платформ різних рівнів складності [6]. Наприклад, квантове перетворення Фур'є займає $O(n \log n)$ кроків, а, по класичному алгоритму – $O(n^2)$. З цього можна дійти невтішного висновку, що обчислювальна навантаження знижується поліноміально.

Було проведено безліч досліджень з апаратної реалізації кубітів. Спочатку як можливі способи реалізації кубітів розглядали ядерний магнітний резонанс (ЯМР) в рідкому середовищі та іонні пастки [7, 8]. Проте останнім часом акцент змістився на кубіти на основі напівпровідників. Одним із прикладів є кремнієвий кубіт, в якому використовується одна або кілька квантових точок, емнісно пов'язаних між двома електродами кремнієвого транзистора з подвійним

затвором. На основі різних рівнів ємнісного зв'язку між цими квантовими точками можна моделювати різні квантові стани. На рис. 4.7 показаний приклад системи з подвійними квантовими точками. Особливо слід зазначити той факт, що кремнієві кубіти мають триваліший час спигової когерентності, а також успадкували всі переваги кремнієвої електроніки. З моменту появи першого кремнієвого кубіту [9, 10] багато дослідних лабораторій та підприємств співпрацюють у створенні масштабованих квантових пристроїв. Наприклад, у Канаді нещодавно оголосили, що працюють над запуском програми квантових обчислень із IBM Q-HUB [11].

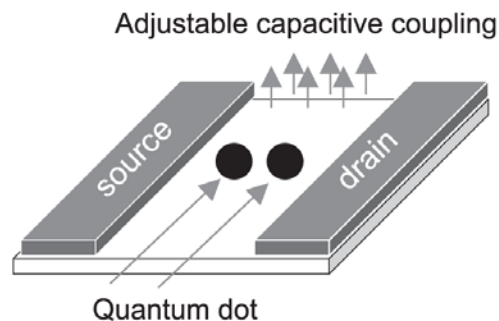


Рисунок 4.7 – Система з подвійними квантовими точками

Для керування кубітами та зчитування їх стану потрібна периферійна система. Функції контролера можуть включати квантове підсилення сигналу, перетворення зі зниженням частоти, оцифрування та багато іншого. На рис. 4.8 показано блок-схему такої системи [12]. Для зчитування кубітів застосовуються оптичні канали, а полегшення многопотокової передачі квантового сигналу між кубітами і контролером передбачені мультиплексування і демуплексування.

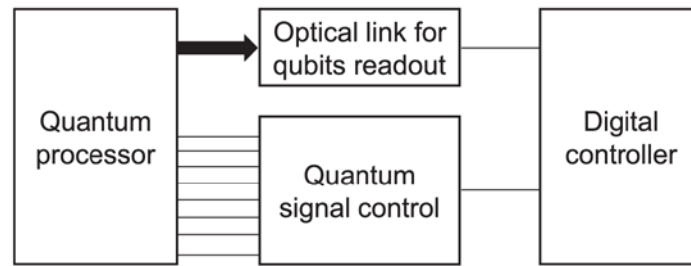


Рисунок 4.8 – Блок-схема периферійної системи керування/зчитування кубітів

Схема контролера зазвичай працює при кімнатній температурі, в той час як система квантових обчислень потребує охолодження до кріотемператури. Великий температурний градієнт між ними може спричинити тепловий шум, що спровокує квантові помилки. Тому для виправлення помилок використовуються надлишкові кубіти, але це збільшує затримку та знижує ефективність квантових обчислень. Щоб вирішити цю проблему, багато дослідників запропонували системи контролерів на основі технології CMOS, що працюють за глибоких кріогенних температур (менше 10 кельвінів), тобто схем кріоCMOS. Тепловий шум можна значно знизити, якщо і квантовий процесор і схема контролера охолоджені до кріотемператур. Це також може знизити складність з'єднань між ними. При цьому, було представлено кілька кріоCMOS-компонентів, включаючи зчитування кубітів, пасивні циркулятори та малошумливі підсилювачі (МШП). Потім з цих компонентів, як приклад описаної вище системи контролера, за 160-нм технології CMOS було виготовлено мікросхему.

КріоCMOS дозволяє квантовому контролеру і процесору працювати при однаковій температурі і зрештою потенційно повністю інтегрувати їх в той самий чіп. Хоча ми поки що не маємо глибокого розуміння того, як CMOS-схеми поведуться при кріогенних температурах, в області кріофізики, нових моделей і моделювання на рівні системи вже проведено значні дослідницькі роботи. Ми очікуємо, що завдяки прогресу в галузі моделей кріоCMOS-схем та функціонування квантових систем кремнієві квантові комп'ютери з високою

продуктивністю, низьким енергоспоживанням та масштабованою продуктивністю стануть реальністю у найближчому майбутньому.

4.7 Нові обчислювальні архітектури

Хоча кінець закону Мура може стимулювати зростання нових обчислювальних парадигм, як і раніше, необхідно покращувати існуючі платформи цифрових обчислень. У той час як звичайна паралелізація може збільшити швидкість обчислень приблизно пропорційно кількості потоків або ядер, вона не здатна оптимізувати розподіл завдань, а це означає, що окремим процесорам можуть не дістатись завдання, для яких вони були розроблені. Поява графічних процесорів уможливило обробку спеціалізованих завдань цільовим обладнанням, а для виконання певних наукових завдань були розроблені інші спеціалізовані процесори/прискорювачі. Наприклад, в [1] повідомляється про спеціалізований суперкомп'ютер для моделювання молекулярної динаміки, який у 180 разів перевищує продуктивність звичайного високопродуктивного комп'ютера. Спеціалізація забезпечує значне підвищення продуктивності обчислень за рахунок більш ефективної оптимізації використання обладнання.

У короткостроковій перспективі спеціалізоване обладнання може продовжувати забезпечувати бажане підвищення продуктивності обчислень.

На одній гетерогенній обчислювальній платформі можна розмістити декілька спеціалізованих типів процесорів/прискорювачів. Наприклад, центральний і графічний процесори можуть бути інтегровані в ту саму схему, щоб об'єднати переваги того й іншого. Центральний процесор фокусується на задачах, пов'язаних з операційною системою, тоді як графічний процесор обробляє завдання, пов'язані з тривимірною графікою, і виконує інтенсивні наукові обчислення. Останнім часом зустрічається безліч повідомлень щодо розробки спеціалізованих процесорів/прискорювачів, включаючи криптографічні співпроцесори, блоки обробки тензорних даних та інші прискорювачі глибокого навчання. Інтеграція центрального процесора та

спеціалізованого обладнання дозволяє набагато ефективніше вирішувати специфічні завдання.

З економічної точки зору підвищені витрати та тривалий час виконання замовлень пов'язані зі специфікою впровадження передових технологій. У той час як великі компанії мають фінансові ресурси для придбання спеціалізованого обладнання високого класу, малих і середніх компаній їх немає, і тому вони не можуть повною мірою скористатися плодами прогресу.

4.8 Висновки до розділу 4

Досліджено особливості реалізації концепції гетерогенних обчислень за рахунок запровадження гнучкого використання апаратного забезпечення, зокрема чіплетів. На відміну від одиночного кремнієвого чіпа, що поєднує всі спеціалізовані процесори/прискорювачі і центральний процесор для задоволення конкретних потреб (вартість зазвичай висока через конструктивну складність), в концепції чіплета система розбита на функціональні блоки, кожен з яких виконує мінімально можливу задачу. В результаті це дозволяє виробникам збирати разом тільки ті блоки, які необхідні для конкретного застосування, з набагато меншими витратами та швидшим введенням у виробництво.

Розглянуто можливості нового програмного забезпечення в рамках гетерогенних обчислювальних платформ. При цьому, комп'ютерні архітектури поділяють на блоки зберігання та обробки даних, що призводить до значного зниження швидкості обчислень під час переміщення даних між ними. Ця проблема відома як "вузьке місце фон Неймана" або "стіна пам'яті". Для вирішення даної проблеми, розглянуто передумови використання нового програмного забезпечення для мінімізації операції переміщення даних при виконанні арифметичних операцій вищого порядку.

Враховуючи, що при розробці нового програмного забезпечення ключовим питанням є перепроєктування існуючих алгоритмів та програмних середовищ для практичної реалізації переваг, що пропонуються спеціалізованим

обладнанням, ще однією проблемою є витрати, пов'язані з переміщенням даних. Визначено, що загальну складність обчислень не слід розраховувати лише на основі кількості операцій із плаваючою комою; швидше, слід також враховувати складність примусового переміщення даних, яких потребує алгоритм. Отже, у новому програмному забезпеченні бажано використовувати оптимізовану топологію доступу до пам'яті/даним, наприклад, неоднорідний доступ до пам'яті.

В результаті визначено необхідність повної переробки апаратного забезпечення для вирішення проблеми вузьких місць у пам'яті. Наприклад, бажано скорочення кількості металевих міжз'єднань або їх заміна, оскільки вони обмежують енергоефективність. Багатообіцяючим варіантом вирішення цієї проблеми є кремнієва фотоніка, де можуть застосовуватися фотонні міжз'єднання і хвилеводи з низькими втратами для зменшення витрати енергії на переміщення даних. Одним із таких прикладів використання інтегрованих фотонних технологій є проект ARPAe ENLITENED, в рамках якого були розроблені нові мережеві топології на основі фотоніки для передачі інформації в центрі обробки даних.

5 ПРОДУКТИВНЕ КАНАЛЬНЕ КОДУВАННЯ РАДІОСИГНАЛІВ В МЕРЕЖАХ 6G

5.1 Обґрунтування необхідності застосування нового кодування

Канальне кодування є фундаментальним аспектом бездротового зв'язку. Від 2G до 5G у бездротових системах завжди використовувалися найсучасніші технології каналного кодування. Інновації в каналному кодуванні, наприклад згорткові коди для 2G, турбокоди для 3G і 4G, а також полярні коди та коди контролю парності з низькою щільністю (low-density parity-check code, LDPC) для 5G, прискорили розвиток технологій кодування. Відповідно до закону Мура продовжують з'являтися кодери та декодери з дедалі більш високою продуктивністю та нижчим енергоспоживанням при менших витратах, що дозволяє використовувати широкий спектр передових технологій каналного кодування. Станом на 2020 рік технологія каналного кодування майже досягла теоретичної межі Шеннона для каналу адитивного білого шуму гауса (additive white Gaussian noise, AWGN) з розумною вартістю реалізації.

Канальне кодування використовується для усунення впливу несприятливих та динамічно змінних середовищ каналів, забезпечуючи надійний зв'язок та високу якість обслуговування. Оскільки 6G охоплюватиме безліч різноманітних варіантів використання, деякі з яких мають екстремальні вимоги, такі як надвисока швидкість передачі даних, наднизькі затримка та енергоспоживання, необхідні інновації в кодуванні каналів 6G, здатні забезпечити побудову оптимального коду для заданого стану каналу та сценарію використання.

Фундаментальне значення теореми Шеннона полягає в тому, що вона дозволяє розглядати каналне кодування та кодування джерела інформації як два підходи до досягнення максимальної пропускної спроможності каналу. Це вірно, якщо розмір інформаційного блоку дуже великий, але це збільшує складність реалізації та час очікування як кодера, так декодера. Таким чином, використання поточних схем роздільного кодування джерела і каналу для досягнення

надвисоких швидкостей передачі даних з надмалою затримкою не є оптимальним. Натомість темою досліджень у галузі 6G стане міжрівневий підхід до спільної розробки кодування джерела та каналу. Такі дослідження будуть важливими для оптимізації характеристик системи у застосуваннях 6G.

Крім класичної теореми Шеннона, є привід переглянути ширше визначення інтелектуального зв'язку. Уоррен Уівер у своїй спільній з Шеноном книзі, опублікованій 1949 року [1], запропонував трирівневу ієрархію інтелектуального зв'язку: перший рівень – технічні проблеми (це теорема Шеннона), другий рівень – семантичні проблеми, а третій – проблеми ефективності. Що стосується 6G, семантичний зв'язок має безліч застосувань у більшості випадків використання 6G, особливо взаємодії машина-машина і людина-машина. В ієрархії інтелектуального зв'язку канал бездротової передачі використовує засноване на теоремі Шеннона внутрішнє каналне кодування і семантичний зовнішній канал. У цьому семантичному каналі коди джерела витягують цікаву семантику, відмінну від простого стиснення семантики, в бік інформаційної ентропії. Інтеграція каналу бездротової передачі та зовнішнього семантичного каналу – це нова фундаментальна область досліджень у 6G, яка вже залучає деяких дослідників [2]. Семантичне вилучення зазвичай виконується за допомогою машинного навчання з використанням методу, що визначається даними.

Канальне кодування може застосовуватися до P2P-комунікацій по каналах AWGN, а також до зв'язку мультиточка-точка (MP2P), точка-мультиточка (P2MP) і мультиточка-мультиточка (MP2MP) по не-AWGN або нестаціонарних каналах. У мережі 6G з великою кількістю комунікацій машина-машина та людина-машина для підвищення загальної ефективності використання спектра в сценаріях зв'язку MP2P, P2MP та MP2MP може застосовуватися мережне кодування. Основна ідея мережного кодування - об'єднати кілька пакетів в один для кращого кодування. Інший важливий аспект використання мережного кодування – це придушення перешкод у цифровій чи аналоговій області. Виграш від використання мережного кодування можуть отримати всі пристрої мережі. Мережеве кодування зазвичай виконується на прикладному рівні, але воно може

виконуватися і на фізичному рівні в 6G через вимоги до затримки та пропускну здатності.

5.2 Схеми канального кодування

З моменту публікації теореми Шеннона в 1948 році в різних системах зв'язку було запропоновано та реалізовано різноманітні схеми канального кодування. У ранніх схемах використовувалися коди алгебри, чиї інформаційні біти і закодовані біти задовольняли лінійним алгебраїчним співвідношенням. Їх пристрій був спрямований на максимальне збільшення кодової відстані за допомогою лінійних алгебраїчних факторів, щоб максимізувати можливості виправлення помилок. Серед перших схем канального кодування були коди Хеммінга [3], коди Голея [4] та коди Ріда-Мюллера (RM) [5]. Ці конструкції коду були обмежувальними за своєю суттю, тому підтримувана ними довжина та швидкість коду були обмежені. Відкриття циклічних кодів [6] призвело до створення набагато більш гнучких схем кодування. Двома яскравими прикладами цього є коди Бозе-Чаудхурі-Хоквенгема (BCH) [7, 8] та коди Ріда-Соломона [9]. Ці циклічні коди алгебри демонструють відмінні характеристики кодової відстані, забезпечуючи хорошу продуктивність в програмних декодерах [10]. Потужні схеми м'якого декодування, такі як декодування списку [11] і декодування на основі порядкової статистики [12], забезпечують достовірність, що досягає максимальної правдоподібності для багатьох коротких кодів.

Канальне кодування стало ключовим фактором, що допомагає бездротовим системам наблизитись до межі Шеннона. Хоча коди алгебри дозволили передавати цифрові сигнали на великі відстані, їх досягнення далекі від межі Шеннона через їх відносно короткі довжини. У системах бездротового зв'язку використовують різні схеми кодування. Наприклад, стандарт 2G застосовував згорткові коди [13], тоді як 3G і 4G використовували турбокоди [14]. Сучасні схеми кодування, такі як турбокоди, наближаються до теоретичної пропускну спроможності каналу за рахунок більшого розміру блоку, що значно покращує

спектральну ефективність мобільного зв'язку. Успіх турбоітеративного декодера призвів до повторного відкриття кодів контролю парності з низькою щільністю (LDPC). Було показано, що нерегулярні конструкції на основі кодів LDPC [15] наближаються до межі Шеннона із зазором всього 0,0045 дБ. Першими кодами, які довели, що вони досягають теоретичної пропускної спроможності каналу та скорочують розрив, були полярні коди [16].

5.3 Цільові KPI каналного кодування 6G

Канальне кодування 6G продовжить покращувати показники в існуючих сценаріях використання 5G, а саме в eMBB, URLLC та mMTC. Ці покращення включатимуть підвищення пікової швидкості передачі даних до рівня Тбіт/с (сьогоднішня швидкість декодування даних eMBB становить 10–20 Гбіт/с), усунення помилок декодування блоку для URLLC та наближення показників декодування коротких блоків для mMTC до межі продуктивності кінцевої довжини [17]. Для інших варіантів використання, таких як автономне водіння, промислове обладнання та супутниковий зв'язок, потрібні специфічні цільові KPI, включаючи субмілісекундну затримку, надійність від семи до десяти дев'яток, високу енергоефективність та тривалий час автономної роботи. На рис. 5.1 показані KPI, що досягаються полярними кодами 5G NR для каналів керування та кодами LDPC 5G NR для каналів даних, стосовно KPI рознесеного каналного кодування 6G.

Деякі типові цільові KPI описані нижче.

- Пропускна здатність Тбіт/с: оскільки зв'язок 6G стане комерційно доступним до 2030 року, програми VR/AR стануть масовими, і багато хто з них використовуватиме ширшу смугу пропускання 6G для бездротової передачі даних зі швидкістю 1 Тбіт/с на короткі відстані. Таким чином, ключовим KPI для 6G буде пікова швидкість передачі 1 Тбіт/с.

- Показники кодів невеликої довжини: у найрізноманітніших сценаріях міжмашинного зв'язку використовуватимуться коди невеликої довжини (тобто

коротше 200 біт). Оптимізація якості кодування покращить охоплення та піде на користь багатьом відповідним застосуванням.

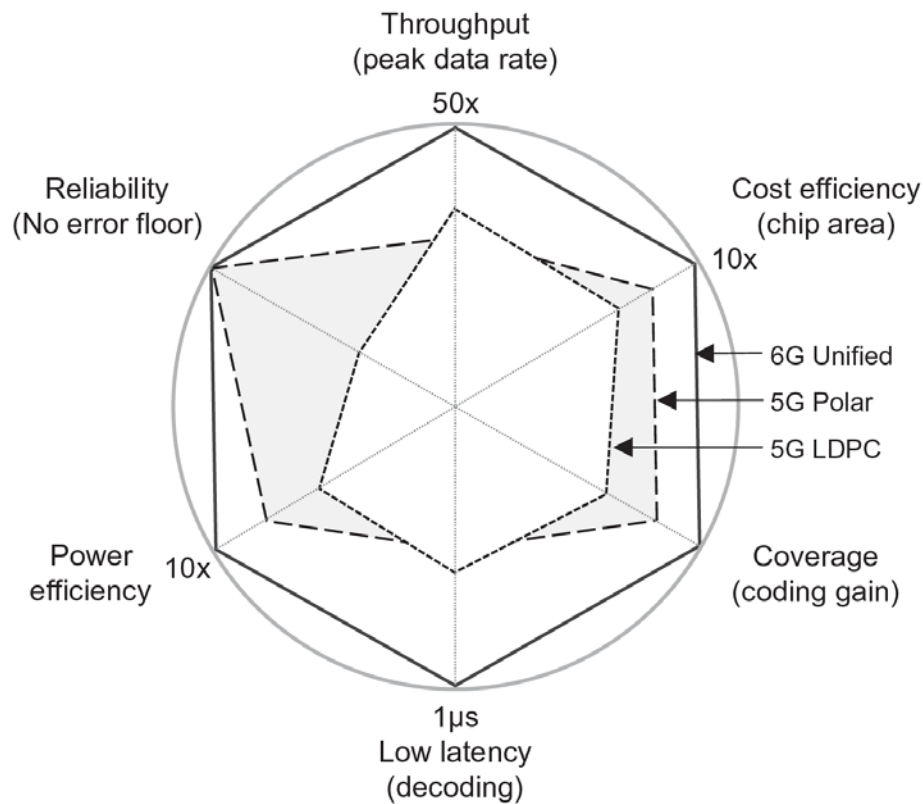


Рисунок 5.1 – Ключові показники ефективності використання каналів в телекомунікаційних системах передавання

Однак в даний час схеми каналного кодування, що використовуються в 5G, мають відставання в 1-2 дБ порівняно з показниками коду кінцевої довжини через обмеження практичного декодера з розумною складністю реалізації. 6G не лише скоротить цю прогалину, а й спростить алгоритми декодування для підвищення енергоефективності декодера.

- Низька затримка кодування та декодування та тривалий термін служби батареї: ключові показники ефективності для конкретних застосувань, такі як висока енергоефективність, тривалий час автономної роботи та низька складність декодування залежать від схеми коду. Їх слід розглядати у поєднанні із затримкою радіоінтерфейсу, надійністю передачі та покриттям. Крім того,

схеми коду повинні бути достатньо гнучкими, щоб адаптуватися до різних комбінацій КРІ для різних сценаріїв використання. Наприклад, застосування з високою надійністю та малою затримкою можуть змиритися з обмеженнями покриття або мобільності, тоді як інші застосування можуть допускати помірну затримку декодування, щоб отримати вищий виграш від кодування (наприклад, для компенсації завмирань, викликаних високою мобільністю).

У міру розвитку кремнієвих технологій для застосування 6G стануть доступнішими більше схем канального кодування. І оскільки складні алгоритми декодування можуть бути реалізовані з меншими витратами, при проектуванні 6G додатково досліджують компроміси між збільшенням продуктивності і складністю реалізації.

5.4 Принципи проектування канального кодування 6G

5.4.1 Єдине та гнучке канальне кодування

У 5G було складно вибрати схему канального кодування, яка задовольняє безліч вимог у кількох випадках використання - не існує єдиної схеми кодування каналу, що підходить для всіх. Ця проблема залишиться в 6G, де різні варіанти використання створять нові проблеми кодування каналів. Оскільки схеми канального кодування, що настроюються, для конкретних випадків використання збільшують складність реалізації, існує сильна мотивація або розробити сімейство кодів, які повторно використовують обладнання і підходять до різних сценаріїв і специфікацій, або розробити структуру, яка ефективно адаптує кілька кодів до різних застосувань.

Така структура, що поєднує коди компонентів або базові коди, має бути уніфікованою та гнучкою. Вона також має бути адаптивною, щоб відповідати вимогам різних сценаріїв використання 6G. Два приклади влаштування такої структури коротко представлені нижче.

Приклад 1: єдина та гнучка структура на основі полярних кодів. Полярні коди демонструють чудові характеристики в широкому діапазоні довжин і швидкостей коду. Завдяки оптимізованій схемі полярні коди досягають стабільних показників при однобітній гранулярності [18] з погляду довжини блоку кодування інформації. Вони також підтримують кілька декодерів [19], в діапазоні від декодування низької складності з послідовною скасуванням (successive cancellation, SC) до більш складного спискового SC декодування (successive cancellation list, SCL) з вищими показниками. Також можуть знайти застосування декодери з м'якою скасуванням (soft cancellation) [20] або декодери з поширенням впевненості (belief propagation) для підтримки м'якого виведення бітів у вдосконалених ітеративних приймачах. А в сценаріях, де бажана висока пропускна здатність, може бути реалізований декодер із перевертанням бітів (bit-flipping) із паралельним плануванням. Хоча декодери на основі SC за своєю сутністю є послідовними, для сценаріїв URLLC можна запровадити певний паралелізм [21]. У сценаріях mMTC, де типові короткі блоки, полярні коди можуть бути оптимізовані з точки зору кодової відстані для досягнення порівнянних характеристик з кодами Ріда-Маллера та розширеними кодами Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема [22]. Для додатків з надвисокою пропускною здатністю застосовують нові схеми GN-суміжно-групових кодів (GN-coset code, описані нижче), які підтримують повністю розпаралелене декодування [20]. Схеми на основі полярних кодів або адаптують декодер, або оптимізують коди для певних цілей. Таким чином, ядро декодування та елементи обробки можуть бути використані в апаратних засобах, а опис коду може бути об'єднано в одну структуру.

Приклад 2: адаптація кількох кодів. Введення кількох кодів вимагає адаптації коду. Коди LDPC – особливо квазіциклічні Raptor-подібні LDPC [23] – підтримують схеми з дрібною гранулярністю та HARQ. Ці коди, які були предметом великих досліджень, добре працюють у сценаріях з високою швидкістю та великою довжиною блоку. Однак їх показники та ефективність реалізації різко знижуються при невеликій швидкості та довжині. У сценаріях з

дуже короткою довжиною блоку полярні коди та коди алгебри (такі як опорний сигнал BCH) більш конкурентоспроможні, ніж коди LDPC [24]. У сценаріях з дуже великою довжиною блоку просторово зв'язані коди [25] з компонентними кодами, такими як коди LDPC [26], полярні коди та інші узагальнені структури пов'язані мають потенціал досягнення оптимального балансу між складністю і продуктивністю. Схеми узгодження швидкості [27] та HARQ просторово пов'язаних кодів вимагають подальшого вивчення. Щоб ефективно поєднувати сильні сторони цих кодів, підхід до адаптації коду може пов'язувати кожен варіант каналного кодування з конкретним варіантом використання або типом пристрою.

5.4.2 Кодування для високої пропускної здатності

Один із найважливіших цільових KPI мережі 6G – висока пропускна спроможність. Щоб впоратися з більш високою складністю та більшим споживанням енергії, потрібні потужні каналні кодери та декодери. Наприклад, для досягнення пропускної спроможності 1 Тбіт/с потрібно приблизно 50-кратне збільшення пропускної спроможності порівняно з обмеженими ресурсами 5G. Нині ні коди LDPC, ні полярні коди що неспроможні досягти ефективності площі кристала понад 1 Тбіт/с на мм^2 і ефективність потужності менше 1 пДж/бит [28]. Декодер LDPC обмежений продуктивністю структури на основі кремнію, тоді як полярний декодер обмежений через свою архітектуру послідовного декодування. Таким чином, метою подальших досліджень є нова архітектура декодування, яка забезпечує високу ефективність та швидку реалізацію.

При розробці схеми кодування для швидкостей порядку 1 Тбіт/с слід віддавати пріоритет низької складності та високого рівня паралелізму декодування, приділяючи особливу увагу апаратній реалізації [29]. Наприклад, коди, реалізовані за допомогою більш простих схем маршрутизації, вимагатимуть меншої площі кристала і демонструватимуть більш високий рівень регулярності як при кодуванні, так і при декодуванні. В якості альтернативи

деякі існуючі коди можуть бути оптимізовані для більш високого паралелізму, більш високої регулярності та нижчої складності або на стороні декодування [30] або як при кодуванні, так і при декодуванні [31].

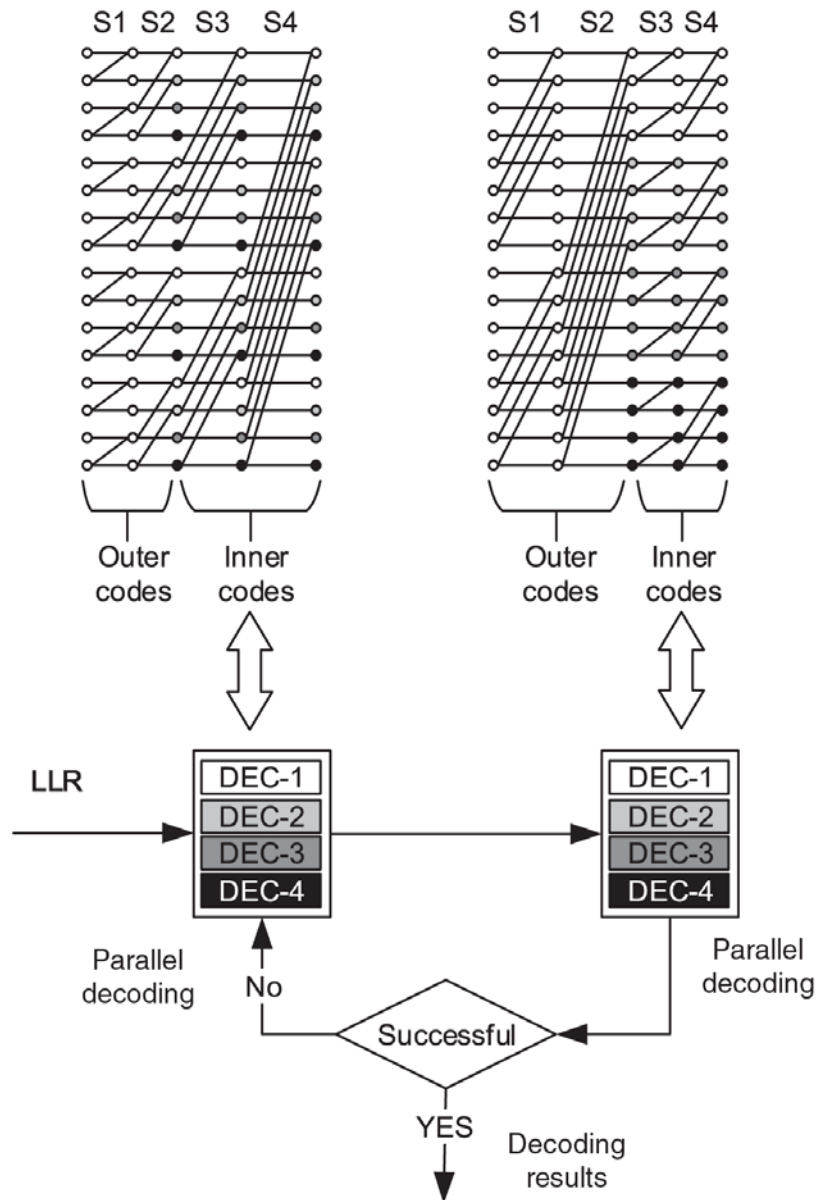


Рисунок 5.2 – Схема кодування для систем передавання даних із швидкістю Тбіт/с

Паралелізований полярний код (сімейство GN-суміжно-групових кодів) включає полярні коди та коди Ріда-Маллера і може підтримувати високопродуктивне декодування з паралелізмом та регулярністю. GN-суміжні

коди можуть бути лінійними блочними кодами з тією ж матрицею, що утворює, що і полярні коди, але з різними наборами інформації. Алгоритм паралельного декодування може бути використаний на факторному графі кодів GN-коду [31]. Цей алгоритм демонструє як високий паралелізм, і високу регулярність. Він обробляє GN-суміжні коди як коди конкатенації та декодує внутрішні коди паралельно. Щоб уникнути послідовного декодування зовнішніх кодів, алгоритм або будує еквівалентний граф декодування, змінюючи місцями зовнішній та внутрішній коди у попередньому графі факторів, як показано на рис. 5.2 або декодує внутрішні коди на обох графах декодування.

5.4.3 Короткі коди

Щоб скоротити відставання в 1 дБ від теоретичної межі виправлення помилок кінцевої довжини, можна розглянути полярні коди та короткі коди алгебри, такі як коди Ріда-Маллера і Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема / Ріда-Соломона [24]. Полярні коди, що обробляються декодером списку послідовних відмін, забезпечують оптимальний баланс між продуктивністю та складністю у сценаріях з малою довжиною блоку і тому підходять для каналів керування 5G. З тієї ж причини в деяких сценаріях 6G, в яких переважатимуть короткі блоки, також можуть застосовуватися полярні коди для даних з додатковою перевагою повторного використання застарілого обладнання 5G. Зі збільшенням розміру списку короткі полярні коди наближаються до межі випадкового об'єднання кодів області з низьким коефіцієнтом помилок [24]. Крім того, для подальшої оптимізації конструкцій коду для списків декодерів можуть використовуватися методи штучного інтелекту [32, 33]. Були проведені деякі дослідження швидких та спрощених реалізацій декодерів SCL [19, 34], і в даний час вивчаються наступні області:

- Показники кінцевої довжини можна поліпшити, змінивши поляризаційні ядра, щоб збільшити швидкість поляризації [35]. До прикладів цього підходу можна віднести згорткові полярні коди [36, 37], полярні коди з великими

двійковими ядрами [38], полярні коди зі змішаним ядром [39] та недвійкові полярні коди [40];

- для подальшого покращення характеристик полярних кодів згорткові коди з коригуванням поляризації (polarizationadjusted convolutional, PAC) [41] можуть бути об'єднані за допомогою полярних перетворень. Завдяки методам декодування Фано ця схема здатна забезпечити досягнення теоретичних меж;

- схеми кодування, що ґрунтуються на конкатенації зовнішнього коду, можуть бути уніфіковані з використанням попередньо перетворених полярних кодів, де мінімальна кодова відстань гарантовано покращиться [22].

Алгебраїчні коди в основному використовувалися в додатках оптичного зв'язку та зберігання даних, але для застосування в бездротовому зв'язку їх схеми кодування необхідно доопрацювати, виходячи з наступних принципів:

- кодова довжина має великий вплив на характеристики. Необхідно дослідження того, як створювати ефективні коди короткого каналу з добрими характеристиками мінімальної відстані;

- потрібна адаптивність до різних розмірів пакетів. Необхідно вивчити практичні методи адаптації швидкості та довжини для високоефективних коротких кодів;

- слід розробити нові алгоритми декодування, що забезпечують баланс між обчислювальною складністю та складністю реалізації. Щодо цього декодування на основі порядкової статистики [12] є життєздатним кандидатом, але потребує подальшої оптимізації для мінімізації складності. Непрактичний декодер не може бути реалізований, навіть якщо він забезпечує близькі до теоретичної межі показники.

5.4.4 Кодування для критично важливих програм

На додаток до звичайних широкосмугових додатків 6G передбачає безліч критично важливих застосувань, що вимагають гарантовано найвищих показників. Існуючі схеми кодування далеко не завжди здатні надати такі

гарантії навіть теоретично, тому в деяких випадках необхідно розробляти коди для конкретних застосувань.

- Надзвичайно висока надійність, від 10^{-7} до 10^{-10} без нижньої межі припустимих помилок та з гарною швидкістю. Хоча при використанні LDPC та інших кодів, що ітеративно декодуються, наявність мінімального рівня помилок неминуче [42], його можна знизити нижче 10^{-10} . Теоретично було доведено, що полярні коди та пов'язані конструкції кодів не мають мінімального рівня помилок і тому підходять для згаданих застосувань. Для подальшого підвищення надійності можуть використовуватися додаткові функції, такі як недвійкові або згорткові конструкції.

- Надзвичайно низька затримка, від 1 до 0,1 мс, для підтримки автономного водіння та промислової автоматизації. Ці програми зазвичай вимагають високої надійності поряд з надзвичайно низькою затримкою кодування та декодування. Тут можуть стати в нагоді алгебраїчні коди, але існуючі схеми вимагають декодування на основі порядкової статистики, що занадто складно для застосування з обмеженою затримкою. Для підтримки такого варіанта використання необхідно розробити нові конструкції коду та схеми декодування. Було продемонстровано, що затримка декодування для коротких полярних кодів дуже мала [21] і може бути знижена додатково за допомогою сегментованого декодування [43] або паралельного декодування [44].

- Надзвичайно низька потужність і вартість для безбатарейних та енергозберігаючих конструкцій з терміном служби від 10 років до нескінченності. Інтелектуальні пристрої будуть модулювати та відображати прийняті радіочастотні сигнали або збирати та накопичувати радіочастотну енергію навколишнього середовища для сеансів радіочастотних передач. У таких пристроях зазвичай використовується дороге обладнання, що потребує надзвичайно низького споживання енергії. Це можна досягти з допомогою спільної конструкції кодової модуляції, у якій канальне кодування розробляється разом із формою сигналу і опорними сигналами [45].

- Надзвичайно висока щільність підключення до 100 млн пристроїв на км².

У щільно розгорнутих системах IoT слід очікувати на виникнення численних колізій. Коди повинні містити як ідентифікатори обладнання, так і дані. Бажано мати схему кодування спільної послідовності з надзвичайно великим простором послідовності/коду, що підтримує некогерентне детектування/декодування.

5.5 Спільне кодування джерела та каналу

Спільне кодування джерела та каналу (joint source and channel coding JSCC) є предметом великих досліджень вже понад 40 років [46]. Верхні межі швидкості кодування каналу для передачі кінцевої довжини були отримані шляхом введення дисперсії каналу [17]. Через кілька років були отримані нижні межі для швидкості кодування джерела з втратами при кінцевій довжині блоку з використанням вихідної інформації з d-нахилом [47]. Результати цих робіт були об'єднані в [48], послуживши доказом того, що JSCC перевершує роздільне кодування джерела та каналу (SSCC) з точки зору загальної швидкості в областях кінцевої довжини. На рис. 5.3 показані відмінності між JSCC та SSCC.

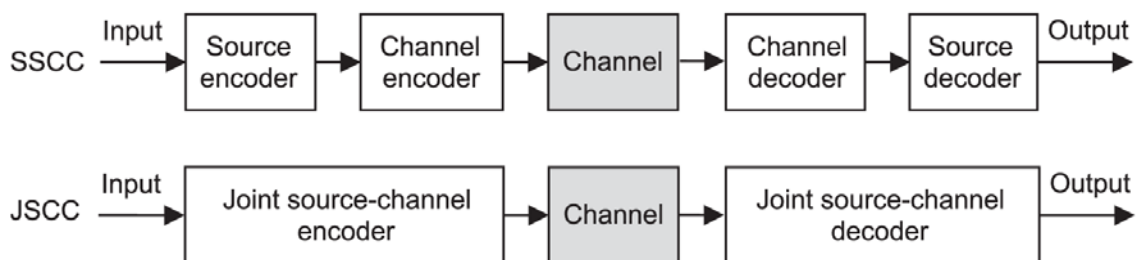


Рисунок 5.3 – Схеми кодування SSCC та JSCC

Ці роботи доводять, що кодування джерела кінцевої довжини часто буває недосконалим, і наступний каналний декодер може використовувати надлишковість, що залишилася. Це викликало серйозний інтерес до JSCC. Наприклад, високорівнева або апостеріорна інформація кодів джерела

(наприклад, Хаффмана [49], JPEG [50], арифметичні [51] та Лемпеля-Зіва [52]) може сприяти каналному декодуванню на основі розріджених графів. У [53] була запропонована спільна схема декодування на основі полярних кодів та мовного декодера, в якій для виправлення більшості помилок декодування на ранніх стадіях використовується словник. Прагнучи застосовувати пам'ять джерел, деякі дослідники побудували спільне декодування марківського джерела та каналу на основі припущення, що деякі джерела можуть бути змодельовані як марківський (або прихований марківський) процес [54, 55]. Для вирішення проблеми дистрибутивного стиснення розрахованих на багато користувачів джерел були запропоновані різні моделі джерел і схеми спільного декодування каналів, засновані на відомій теоремі Сlepіана-Вольфа [56, 57]. Хоча ці реалізації JSCC перевершують аналогічні SSCC, вони залежать від схем стиснення джерела і страждають від поганої узагальненості. Іншими словами, якщо схема стиснення джерела змінюється, об'єднаний декодер має бути перепроєктований заново.

Ще одна область JSCC, яка привертає велику увагу дослідників, – бездротова передача зображень/відео. Наприклад, у [58] запропонували схему аналогової передачі під назвою SoftCast. У цій схемі пікселі вихідного зображення лінійно кодуються в аналогові коефіцієнти і передаються через OFDM, а приймач декодує пікселі з якістю безперервного каналу. Для вирішення проблеми низької ефективності використання спектра та слабкого ступеня стиснення, властивих аналоговій передачі, були запропоновані деякі гібридні схеми аналогово-цифрової передачі. Наприклад, в [59] пропонується передавати цифровий базовий рівень за допомогою традиційних цифрових методів, а «уточнюючий» рівень – за допомогою псевдоаналогового та просторового мультиплексування. У [60] відображення Шеннона-Котельникова було адаптовано для подальшого стиснення аналогових коефіцієнтів. Також нещодавно обговорювалася можливість використання JSCC для передачі зображень у далекий космос. Прикладом цього є пропозиція використовувати заснований на кодах Raptor спосіб лінійного кодування для заміни традиційного ентропійного кодування, тим самим підвищуючи стійкість до декодування

помилки і уникаючи надмірно тривалого часу повторної передачі. Як показують ці роботи, JSCC може значно зменшити затримку передачі та забезпечити прийнятну якість зображення/відео навіть за поганого стану каналу. Однак усі пропонувані схеми націлені на конкретний сценарій: передачу зображення/відео. Спільна схема кодування джерела та кодування каналів сильно інтегрована, що ускладнює широке поширення такої конструкції.

Також розглянуто можливість поєднання методів машинного навчання з JSCC. При цьому, пропонується використовувати для бездротової передачі зображення JSCC на основі автоенкодера, де зашумлений канал зв'язку представлений як проміжний рівень в парі кодер-декодер. У [3] і [4] було досліджено суміщену передачу-розпізнавання на основі глибокої нейромережі для бездротової передачі даних на сервер з метою подальшого розпізнавання. На додаток до зображень також може використовуватися JSCC на основі машинного навчання захисту передачі тексту по зашумленому каналу, як описано в [5] і [6]. Подібно до попередніх робіт, ці підходи JSCC з опорою на машинне навчання можуть покращити адаптованість каналів та збільшити простір оптимізації в порівнянні з традиційними JSCC; Проте відповідні схеми орієнтовані конкретне завдання, а чи не на узагальнене рішення. У статтях [5] та [6] обговорювалося, як зберегти семантичну інформацію пропозицій замість мінімізації кількості бітових помилок при бездротовій передачі.

5.6 Спільне кодування джерел та каналів на основі машинного навчання

Розвиток штучного інтелекту та машинного навчання, безперечно, вплине на JSCC. З точки зору 6G, семантичний зв'язок Уівера має безліч застосувань у більшості сценаріїв використання, пов'язаних з міжмашинним обміном. Ця архітектура включає внутрішній канал, що ґрунтується на класичному каналовому кодуванні, та зовнішній семантичний канал, що ґрунтується на глибокому навчанні. Інтеграція цих двох каналів предмет досліджень, деякі результати вже опубліковані [2].

Однією з важливих цілей міжмашинної взаємодії 6G є створення нової парадигми кодування джерела зв'язку між об'єктами штучного інтелекту за допомогою машинного навчання. У пошуках просунутого кодування джерела для агентів III основною рушійною силою є машинне навчання на основі глибоких нейронних мереж. Зокрема, навчена нейромережа розділяє багатовимірне простір, у своїй навчання сприймається як «інтерполятор», яке висновок сприймається як «екстраполятор». І навпаки, глибока нейромережа також є редуктором розмірності, який стискає або кодує вихідну інформацію, видаляючи нерелевантні та менш важливі компоненти з низькорозмірного уявлення. Крім того, глибока нейромережа може бути розглянута як розширювач вимірювання, декомпресор або декодер джерела з його низькорозмірного уявлення.

Як правило, нейромережі кодера та декодера підключаються через архітектуру автоенкодера, яка в цілому відображає теорему швидкості-спотворення: збільшення розміру вузького місця зменшує спотворення, тоді як зменшення розміру збільшує спотворення.

Можливі варіанти реалізації JSCC для зв'язку між об'єктами штучного інтелекту можуть включати такі варіанти:

- JSCC поза класичної теорії інформації Шеннона: метою класичного кодування джерела є стиск потоку даних джерела інформації. Це робиться, щоб мінімізувати вартість передачі та максимізувати пропускну спроможність мережі. Найчастіше вихідне кодування оптимізовано насамперед для високої достовірності людського сприйняття. На передавальній стороні дані максимально стискаються зі збереженням інформації по Шенону. На стороні, що приймає, одержувач розпаковує інформацію без впливу на якість сприйняття людиною. У 6G, однак, метою кодування джерела є не збереження точності людського сприйняття, а, скоріше, забезпечення міжмашинного зв'язку. Можливе подальше стиснення потоку даних, навіть якщо кодування джерела застосовується до великих даних у машинному навчанні (тобто під час навчання глибокої нейромережі);

- нова метрика, що виходить за рамки теореми швидкості-спотворення: у практичних застосуваннях було досягнуто оптимального балансу між двома класичними метриками: швидкістю та спотворенням. Однак у спілкуванні між людьми такий баланс потребує додаткової метрики, тобто якості людського сприйняття через оцінку за участю людини. У дослідженні 6G нам також необхідно вивчити нову метрику для міжмашинної взаємодії, тобто аналогічний показник сприйняття машини, оцінка якого може бути реалізована за допомогою глибокої нейромережі;

- багатополісний JSCC: класична теорія інформації розглядає кодування багатополісного джерела на основі теореми Вольфа, яка передбачає, що два вхідні потоки є незалежними і однаково важливими. Однак у багатьох практичних сценаріях 6G дані з датчиків можуть бути незалежними чи однаково важливими. Наприклад, два датчики можуть вимірювати той самий показник фізичного світу, але робити це з різних місць або з використанням різних технологій. Крім того, один датчик може збирати більше інформації, ніж інший, відчувати більше завад каналу або залежати від коефіцієнта використання каналу іншого датчика. Набирають популярність дослідження розрахованого на багато користувачів JSCC, особливо в застосуваннях для побудови глибокої нейромережі, де мультисенсорні великі дані стискаються для навчання машинної моделі.

Глибока нейромережа підтримує багатополісні входи. Один такий вхід може бути призначений як основний вхід для машинного навчання. Під час процесу навчання інші вхідні дані автономно зважуватимуться і об'єднуюватимуться нейронами. У цьому випадку нейромережа відкидатиме невідповідну інформацію, що надійшла з датчика, надавши йому низьку вагу;

- JSCC, що залежить від завдання: традиційне кодування джерела фокусується на спотворенні наскрізного каналу задоволення вимог людського сприйняття. Однак вимоги машинного сприйняття можуть значно відрізнитися в таких аспектах, як виявлення, класифікація та реконструкція об'єкта. Досить очевидно, що виявлення чи класифікація мети припускає більше стиснення

інформації, ніж реконструкція мети. За допомогою навчання енкодерів та декодерів глибокої нейромережі можуть бути реалізовані різні завдання машинного навчання.

5.7 Принципи проектування JSCC для 6G

У порівнянні з SSCC схема JSCC більш ефективна при кодуванні блоків кінцевої довжини та обмеженнях затримки. Багато існуючих систем оптимізують структуру JSCC на основі схеми стиснення (наприклад, стиснення Хаффмана [49, 53]) або залежно від типу джерела даних (наприклад, зображення [1, 2] або текст [5, 6]). Однак у 6G є три можливості нового застосування JSCC. Перша – це базовий міжмашинний бездротовий зв'язок із короткими блоками та малою затримкою. Друга – це високошвидкісний відеозв'язок для віртуального світу, де гібридні аналогові та цифрові JSCC можуть забезпечити низьку затримку та низьке енергоспоживання завдяки простій схемі стиснення, особливо для зв'язку на малих відстанях. У машинному навчанні дані можуть бути стиснуті за допомогою методів автокодування, що базуються на інформаційно вузькому місці. Це третя нова сфера застосування – комунікації між об'єктами ШІ в 6G.

Щоб підвищити ефективність JSCC та його застосувань у 6G, необхідна узагальнена схема. Крім того, для отримання цікавої семантики в комунікаціях міжмашинного типу можуть використовуватися методи машинного навчання. Деякі міркування щодо розробки та напрямів подальших досліджень перераховані нижче:

- бажано розробити узагальнену схему для JSCC. Така схема має бути застосована до різних сценаріїв і не сильно залежати від схеми стиснення джерел;

- для відповідності вимогам різних сценаріїв потрібна підвищена масштабованість. З цією метою можна провести дослідження JSCC на бітовому рівні та на рівні повідомлень, наприклад для захисту від помилок на бітовому рівні та рівні повідомлення відповідно;

- для JSCC необхідні нові опорні метрики проектування, особливо міжмашинного зв'язку. Такі метрики повинні враховувати передачу із втратами, своєчасність інформації, керування увагою, пам'ять джерел та каналів тощо;
- для сценаріїв з великою кількістю підключень, особливо для міжмашинних взаємодій, інформація, яка спільно використовується різними користувачами, може сильно корелювати. Цю кореляцію можна використовуватиме подальшого підвищення ефективності JSCC;
- кодування джерела та обмін даними з використанням машинного навчання відкривають ширший простір для оптимізації JSCC порівняно з традиційними підходами. Виконані дослідження заклали фундамент для нових підходів до розробки, але необхідні подальші дослідження. А для захисту конфіденційності користувачів бажана система, заснована на «чорній скриньці» контенту та «білій скриньці» каналу.

5.8 Мережеве кодування на фізичному рівні

Теорема Шеннона розглядає зв'язок «точка-точка» по наскрізному каналу без пам'яті AWGN, тоді як мережеве кодування має справу з кодуванням для багатоточкових мереж. У цьому випадку мережеве кодування фізично забезпечує вигреш у показниках за рахунок кращого кодування та рознесення вузлів, особливо у разі досить великого переліку застосувань 6G, що мають обмеження допустимої затримки. Через потенційного збільшення показників цікавить подальше дослідження мережного кодування, зокрема навіть аналогових сигналів (аналогового мережевого кодування). Мережеве кодування було вперше представлено Алсведе, Каєм, Лі та Йунгом у 2000 році [7]. Вузол обробки кодує вхідні інформаційні потоки підвищення ефективності використання спектра. Щоб виконати це мережеве кодування, вузол кодування приймає та об'єднує кілька пакетів у об'єднаний пакет та передає його. Вхідні потоки можуть надходити від одного або декількох вузлів, які називаються внутрішньосесійними або міжсесійними відповідно. Більш довгий кодовий блок

означає вищий виграш від кодування, а різні шляхи передачі представляють деякий виграш від рознесення. При цьому розглядаються декілька типів мережевого кодування на фізичному рівні, які коротко перераховані нижче.

- Лінійне мережеве кодування: вузол кодування виконує лінійну комбінацію вхідних даних. Це може бути така проста операція, як виключає АБО (XOR). Лінійне мережеве кодування відносно просто і широко використовується для мовлення та ретрансляції. Випадкове лінійне мережеве кодування працює аналогічно, але використовує випадковий коефіцієнт подолання невідомих топологій чи дистрибутивного зв'язку.

- Аналогове мережеве кодування (ANC): воно працює безпосередньо з аналоговими сигналами, накладаючи електромагнітні хвилі від S_1 та S_2 на релейному вузлі. ANC зазвичай використовується у двосторонньому релейному зв'язку, як показано на рис. 5.4 в.

5.9 Сценарії застосування мережевого кодування на фізичному рівні

- Мережеве кодування для ширококомовного/групового/одноадресного зв'язку: у 5G з'явилася групова передача з HARQ для зв'язку прямого каналу для підвищення надійності. Однак ефективність та затримка HARQ можуть бути додатково покращені, особливо в сценаріях ширококомовної та групової передачі, як показано на рис. 5.4 а. Оскільки одна і та ж частина інформації передається безлічі пристроїв, ймовірність втрати інформації висока, особливо для пристроїв в поганих умовах каналу. Ця ймовірність може бути зменшена шляхом використання мережевого кодування (наприклад, з XOR для повторної передачі HARQ) для об'єднання втрачених пакетів від різних приймачів або одного приймача [1, 7]. Під час одноадресної передачі інформація, відправлена одному пристрою, може бути підслухана іншим пристроєм, тобто може бути дозволена повторна передача HARQ на основі мережевого кодування [3].

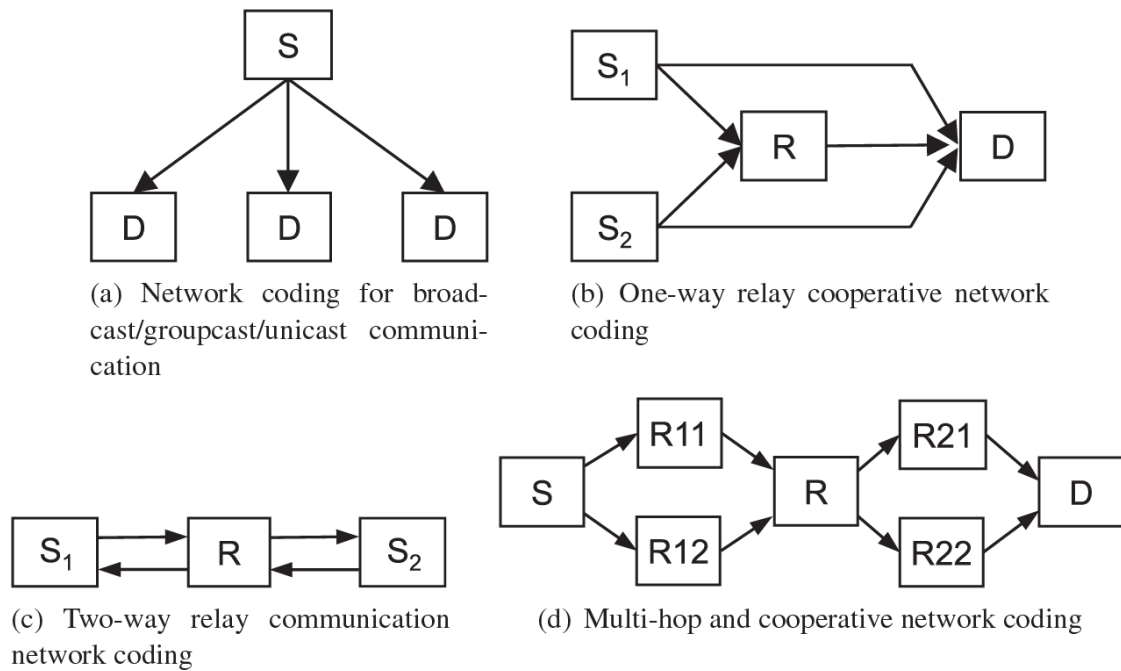


Рисунок 5.4 – Схеми мережного кодування

- Мережеве кодування з односторонньою кооперативною ретрансляцією: односторонній релейний кооперативний зв'язок підвищить надійність. На рис. 5.4 б і S_1 , і S_2 відправляють інформацію до D в ортогональних ресурсних одиницях у першій фазі, а ретранслюючий вузол R пересилає інформацію, отриману від S_1 і S_2 , в інших ортогональних ресурсних одиницях у другій фазі. Мережеве кодування може підтримувати той самий порядок рознесення з аналогічним просторовим трактом, але з меншою кількістю ресурсів, порівняно зі схемою з ортогональними одиницями ресурсів у другій фазі [4]. На другому етапі вузол R може виконати операцію XOR між бітами, прийнятими від S_1 та S_2 . У той час як традиційна схема займає чотири одиниці ресурсу, представлена схема кодування мережі фізично вимагає лише трьох для досягнення того ж порядку рознесення.

- Мережеве кодування з двостороннім релейним зв'язком: двосторонній релейний зв'язок дозволить двом джерелам, наприклад S_1 і S_2 на рис. 5.4 в, зв'язуватись один з одним через релейний вузол.

Якщо на другому етапі використовується цифрове мережеве кодування, потрібні три одиниці ресурсу, тоді як якщо використовується аналогове мережеве кодування, потрібні лише дві одиниці ресурсу. Одним із типів аналогового мережевого кодування є мережеве кодування фізичного рівня, запропоноване в роботах [8, 9]: на першому етапі два джерела одночасно передають сигнали на ретранслятор, припускаючи адекватну синхронізацію. Після прийому ретранслятор спочатку виконує каналне декодування накладеного сигналу, потім перетворює накладену інформацію інформацію мережевого кодування і нарешті застосовує каналне кодування для ширококомовної передачі двом джерелам. Оскільки джерелам невідомі перешкоди, вузли-джерела виконують операції XOR, щоб отримати очікуваний сигнал ширококомовного сигналу. На відміну від мережевого кодування фізично, ретранслятор з аналоговим мережним кодуванням [7] просто посилює і ширококомовно передає отриманий сигнал мережевого кодування обом джерелам. Потім кожен вузол-джерело може декодувати свій очікуваний сигнал на основі відомого сигналу.

- Кодування багатоланкової та кооперативної мережі: кооперативний багатоланковий зв'язок – це різновид передачі в комірковій мережі, як показано на рис. 5.4 г. Однак компроміси між пропускнуою здатністю, затримкою та надійністю для пористих мереж до кінця не вивчені. Одним із прикладів схеми є адаптивне випадкове мережеве кодування [6, 7]. Було розглянуто мережеве кодування при багатоланковій спільній передачі. Виходячи із зворотного зв'язку та кількості нових пакетів, використовується як апріорне, так і постериорне мережеве кодування з прямою корекцією помилок. Між сусідніми переходами пропонується узгодження швидкості для вирівнювання швидкості тракту та максимізації пропускнуої спроможності [7].

5.10 Принципи проектування мережевого кодування 6G

Мережеве кодування дає дві істотні переваги: виграш від кодування та виграш від рознесення. З точки зору теорії інформації, додаткова інформація допоможе декодеру нейтралізувати відомі радіоперешкоди. Таким чином, ми можемо розширити область застосування мережевого кодування від широкомовної/групової передачі до кооперативної та ретрансляційної передачі в 6G.

- Миттєво декодоване мережеве кодування: для задоволення вимог до наднизкої затримки та вартості в 6G були запропоновані схеми миттєво декодованого мережевого кодування (instantly decodable network coding, IDNC) [8, 9]. Кодери та декодери мережного кодування використовують лише простий двійковий XOR для зменшення затримки та споживання пам'яті, незважаючи на втрату інформації. Прогресивний декодер IDNC вигідний для зв'язку, чутливого до затримок, але вимагає наявності достатнього зворотного зв'язку для отримання статусу декодування приймача.

- Спільне каналне та мережеве кодування: мережеве кодування, яке застосовується фізично, розглядається як «зовнішній код». Для підвищення продуктивності каналне та мережеве кодування можна розробляти разом, розділяючи між ними інформацію про надмірність. Частина інформації про надмірність включається в кодове слово каналу, а решта включається в мережеве кодове слово і передається іншим шляхом через вузол ретрансляції [8]. Вузол декодування може використовувати послідовне скасування для декодування інформації з обох кодових слів. Очікується, що в 6G значну частку користувачів складатимуть машини, які можуть працювати разом, формуючи адаптивне мережеве кодування [1]. Чи переважають вигоди від кодування та рознесення переваги надмірності, залежить від структури додаткової інформації та поділу між спільно працюючими користувачами.

- Аналогове мережеве кодування (ANC): очікується, що ANC забезпечить меншу затримку та більшу ефективність. Схему ANC типу 1 (ANC-1)

запропоновано у 2006 р.; було проведено як теоретичні роботи, і перевірка прототипу [9]. ANC-1 вимагає, щоб дві лінії зв'язку з релейним вузлом були синхронізовані з точки зору амплітуди, фази, часу і частоти; однак досягти цього складно [3], і може знадобитися більш високе навантаження на калібрування та квітання зв'язку. ANC-2 [7] знижує вимоги до синхронізації, при цьому забезпечуючи низьку затримку, але підсилює як сигнали, так і шум. У сценаріях з високим відношенням сигнал/шум бажано використовувати ANC-2, тому що високе відношення сигнал/шум може додатково підкріплено плануванням променів.

5.11 Висновки до розділу 5

Досліджено каналне кодування, що дозволяє досягти теоретичної пропускної спроможності, допомагає поліпшити багато аспектів досвіду користувача. Наприклад, високий коефіцієнт кодування розширює покриття мережі та покращує якість обслуговування, особливо на межах стільника. Крім того, високорозпаралелений декодер збільшує пікові швидкості передачі даних; а проста, зручна для апаратної реалізації схема суттєво знижує енергоспоживання, тим самим збільшуючи термін служби батареї. Ці переваги відіграли ключову роль успіху бездротових пристроїв попередніх поколінь. Стандарти 5G NR передбачають використання полярних кодів та кодів LDPC для каналів керування та каналів даних відповідно.

Визначено, що для сценаріїв використання 6G будуть потрібні характеристики, що перевершують можливості 5G: більш високі швидкості передачі даних, більш висока надійність, менша складність та менше енергоспоживання. Вони також вимагають більш різноманітного набору KPI, якого не було у попередніх поколіннях. Також розглянуто ключові вимоги та ключові показники ефективності, знання яких потрібне для проектування кодування каналів 6G, а також деякі принципи проектування.

6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

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

Дослідження на тему «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G» 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.

6.1 Оцінювання наукового ефекту

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

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

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

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	64	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	60	0	57
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0

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

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		60,3		

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 6.2 – 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	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	63	69	66

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

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	66,0		

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 [61]:

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

де $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 60,3, k_{\text{теор}} = 66,0$ балів;

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

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 60,3 + 0,4 \cdot 66,00 = 62,60 \text{ балів.}$$

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

Таблиця 6.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

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

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G», даний рівень становить 62,60 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

6.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

6.2.1 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 [61]:

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

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

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

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 14250,00 \cdot 36 / 21 = 24428,57 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Науковий керівник НДР	14250,00	678,57	36	24428,57
Інженер-розробник телекомунікаційних систем 1-ї категорії	14150,00	673,81	32	21561,90
Провідний фахівець проблем моделювання систем зв'язку	14000,00	666,67	9	6000,00
Технік 1-ї категорії	7065,00	336,43	17	5719,29
Всього				57709,76

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G» розраховуємо за формулою:

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

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

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

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

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

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

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду [61];

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.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,65 / (21 \cdot 8) = 72,38 \text{ грн.}$$

$$Z_{p1} = 72,38 \cdot 7,20 = 521,16 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Підготовка робочого місця інженера-розробника телекомунікаційних систем	7,20	2	1,10	72,38	521,16
Інсталяція програмного забезпечення математичного моделювання систем 6G	5,40	3	1,35	88,83	479,71
Введення програмних блоків моделювання поведінки апаратури систем 6G	11,50	4	1,50	98,71	1135,11
Налагодження програмних блоків математичної моделі	3,80	5	1,70	111,87	425,09
Формування (введення) бази даних дослідження моделі	25,00	3	1,35	88,83	2220,87
Тестування взаємодії моделей НВЧ приймача, передавача, антенного обладнання	10,00	5	1,70	111,87	1118,66
Контроль експерименту	40,00	5	1,70	111,87	4474,64
Всього					10375,25

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

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

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

$$Z_{\text{доо}} = (57709,76 + 10375,25) \cdot 10 / 100\% = 6808,50 \text{ грн.}$$

6.2.2 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:

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

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

$$Z_n = (57709,76 + 10375,25 + 6808,50) \cdot 22 / 100\% = 16476,57 \text{ грн.}$$

6.2.3 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 «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G».

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, 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:

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

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

n – кількість видів матеріалів;

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

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

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

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

$$M_1 = 4,0 \cdot 284,00 \cdot 1,11 - 0 \cdot 0 = 1260,96 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір Офісний А4 500	284,00	4,0	0	0	1260,96

Таблиця 6.6 – Витрати на матеріали (продовження)

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір для записів А4 250	152,00	6,0	0	0	1012,32
Органайзер офісний	171,00	3,0	0	0	569,43
Канцелярське приладдя	221,00	4,0	0	0	981,24
Картридж для принтера	1022,00	2,0	0	0	2268,84
Диск оптичний CD-R	22,60	4,0	0	0	100,34
Flesh-пам'ять 64 GB	582,00	1,0	0	0	646,02
Всього					6839,15

6.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_6), які використовують при проведенні НДР на тему «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (6.8)$$

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

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

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

$$K_6 = 1 \cdot 6820,00 \cdot 1,12 = 7638,40 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Роутер з підтримкою технології MIMO	1	6820,00	7638,40
Антенні решітки спеціалізовані (комплект)	1	7380,00	8265,60
Всього			15904,00

6.2.5 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:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (6.9)$$

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.

$$B_{\text{спец}} = 110795,00 \cdot 1 \cdot 1,12 = 124090,40 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 6.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Комп'ютерне обладнання для вирішення проблем моделювання процесів в системах 6G EOM HP Z6 G4 WKS Tower i9/ Xeon Silver 4108 (6QP06EA)	1	110795,00	124090,40
Всього			124090,40

6.2.6 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:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.і}} \cdot K_i, \quad (6.10)$$

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

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

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

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 9860,00 \cdot 1 \cdot 1,12 = 11043,20 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 6.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Математичне середовище MatLab 12	1	9860,00	11043,20
Прикладне ПЗ Mathematica	1	7580,00	8489,60
Модель імітатора НВЧ передавача	1	3870,00	4334,40
Модель імітатора НВЧ приймача	1	4620,00	5174,40
Всього			29041,60

6.2.7 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:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б}}{T_{в}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (6.11)$$

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.

$$A_{обл} = (8420,00 \cdot 2) / (2 \cdot 12) = 701,67 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
ОС Windows	8420,00	2	2	701,67
Прикладний пакет Microsoft Office	7350,00	5	2	245,00
Пакет Visual System Simulator	7690,00	4	2	320,42
Пакет Microwave Office	8260,00	5	2	275,33
Пакет Matlab 2020	6520,00	5	2	217,33
Пристрої передачі даних	8320,00	3	2	462,22
Оргтехніка	10325,00	5	2	344,17
Приміщення лабораторії досліджень	625000,00	25	2	4166,67
Робоче місце інженера-розробника телекомунікаційних систем	9420,00	5	2	314,00
Метрологічний комплекс	14685,00	4	2	611,88
Всього				7658,68

6.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (6.12)$$

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 $C_e = 6,20$ грн;

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

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

$$V_e = 0,05 \cdot 250,0 \cdot 6,20 \cdot 0,95 / 0,97 = 77,50 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 6.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Роутер з підтримкою технології MIMO	0,05	250,0	77,50
Комп'ютерне обладнання для вирішення проблем моделювання процесів в системах 6G EOM HP Z6 G4 WKS Tower i9 / Xeon Silver 4108 (6QP06EA)	0,42	220,0	572,88
Пристрої передачі даних	0,08	220,0	109,12
Оргтехніка	0,56	15,0	52,08
Робоче місце інженера-розробника телекомунікаційних систем	0,12	220,0	163,68
Метрологічний комплекс	0,15	100,0	93,00
Всього			1068,26

6.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-

правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

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

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

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cv} = 20\%$.

$$B_{cv} = (57709,76 + 10375,25) \cdot 20 / 100\% = 13617,00 \text{ грн.}$$

6.2.10 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:

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

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

$$B_{cn} = (57709,76 + 10375,25) \cdot 30 / 100\% = 20425,50 \text{ грн.}$$

6.2.11 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:

$$I_{\text{в}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{ив}}}{100\%}, \quad (6.15)$$

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

$$I_{\text{в}} = (57709,76 + 10375,25) \cdot 50 / 100\% = 34042,51 \text{ грн.}$$

6.2.12 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:

$$B_{\text{нзв}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (6.16)$$

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

$$B_{нзв} = (57709,76 + 10375,25) \cdot 100 / 100\% = 68085,01 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{одд} + Z_n + M + K_в + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_в + B_{нзв}. \quad (6.17)$$

$$B_{заг} = 57709,76 + 10375,25 + 6808,50 + 16476,57266 + 6839,15 + 15904,00 + 124090,40 + 29041,60 + 7658,68 + 1068,26 + 13617,00 + 20425,50 + 34042,51 + 68085,01 = 412142,20 \text{ грн.}$$

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

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (6.18)$$

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

$$ZB = 412142,20 / 0,9 = 457935,78 \text{ грн.}$$

6.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

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

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

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

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (6.19)$$

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

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 $R = 3$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 457935,78$ 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 [61].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 3 \cdot 3 / 457,9 \cdot 0,17 = 7,55.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

6.4 Висновок до розділу 6

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G» складають 457935,78 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень науково-економічного ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

7 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Аналіз апаратного забезпечення мобільних систем 6G відбуватиметься в приміщенні, яке обладнане робочими місцями з ПК. На розробника можуть мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори (згідно ГОСТ 12.0.003-74 [64]):

1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена чи понижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена чи понижена іонізація повітря;
- недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні:

- статичне перевантаження;
- розумове перевантаження;
- емоційні перевантаження.

Відповідно до визначених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

7.1 Технічні рішення з безпечного виконання робіт

7.1.1 Технічні рішення з організації робочого місця під час проектування

Від того, яким чином організоване робоче місце, багато в чому залежить ефективність праці робітника, незалежно від тієї посади, яку вони займають. Завдання раціональної організації робочих місць включає в себе не тільки устаткування його усім необхідним відповідно до змісту та характеру роботи, яка ним виконується, але й раціональне його розміщення, створення комфортних умов праці.

Організація робочого місця – це сукупність заходів щодо устаткування робочого місця засобами і знаряддями праці та їх розміщення у визначеному порядку

Організація робочого місця передбачає:

- правильне розміщення робочого місця у виробничому приміщенні;
- вибір ергономічно обґрунтованого робочого положення, виробничих меблів з урахуванням антропометричних характеристик людини;
- раціональне компонування обладнання на робочих місцях;
- урахування характеру та особливостей трудової діяльності.

Велике значення надається характеристикам робочого крісла. Воно виконується відповідно до НПАОП 0.00-7.15-18 [69]. При проектуванні крісла виходять з того, що при будь-якому робочому положенні дослідника його поза повинна бути фізіологічно правильно обґрунтованою, тобто положення частин тіла повинно бути оптимальним. Для задоволення вимог фізіології, що впливають з аналізу положення тіла людини в положенні сидючи, конструкція робочого сидіння повинна відповідати таким основним вимогам:

- допускати можливість зміни положення тіла, тобто забезпечити вільне переміщення корпусу і кінцівок тіла один щодо одного;
- допускати регулювання висоти в залежності від росту працюючої людини (в межах від 400 до 550 мм);

мати злегка увігнуту поверхню, мати невеликий нахил, тому поверхню сидіння рекомендується робити м'якою, передній край закругленим, а кут нахилу спинки робочого крісла - регульованим.

7.1.2 Електробезпека приміщення

Приміщення, де здійснювалася робота за небезпекою ураження електричним струмом можна віднести до 1 класу, тобто це приміщення без підвищеної небезпеки (сухе, мало заповишене, з нормальною температурою повітря, ізольованими підлогами і малим числом заземлених приладів) [70].

На робочому місці з усього обладнання металевим є лише корпус системного блоку комп'ютера, в якого крім робочої ізоляції передбачений елемент для заземлення та провід з заземлюючий жилою для приєднання до джерела живлення.

Електротехнічне устаткування: апаратури, кабелі й керівництва, розподільні пристрої всіх видів і напруг по своїх номінальних параметрах задовольняє умовам роботи як при нормальних режимах, так і при коротких замиканнях, перенапругах, перевантаженнях.

Для забезпечення безпеки устанавлюються наступні технічні рішення:

- Забезпечено недоступність струмопровідних частин (застосована схована проводка, кабель прокладений у спеціальних ринвах).
- Забезпечено ізолювання струмопровідних частин з використанням ізоляції, опір якої не нижче 1кОм/В, передбачені постійний контроль і профілактика ізоляції.

Напруга освітлювальної мережі приймається 220 В із заземленою нейтраллю.

7.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

7.2.1 Мікроклімат

Властивість організму людини підтримувати тепловий баланс із довкіллям називається терморегуляцією. Нормальні фізіологічні процеси можливі лише тоді, коли тепло, що виділяється організмом людини, постійно відводиться у довкілля.

Мікрокліматичні умови, за яких це можливо, вважаються найкращими. Кількість тепла, що утворюється в організмі працівника, залежить від фізичних навантажень, а рівень тепловіддачі – від мікрокліматичних умов.

Дослідження апаратного забезпечення мобільних систем 6G згідно гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності

факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу [62] за енерговитратами відноситься до категорії I б. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл. 7.1 (відповідно ДСН 3.3.6.042-99 [68]).

Таблиця 7.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	40-60	0,1-0,3
Холодний	20-24	75	0,2

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату передбачено:

1. Система опалювання та енергозберігаюча обробка приміщення.
2. Установка в приміщенні припливно-витяжної вентиляції.

Систематичне вологе прибирання.

7.2.2 Склад повітря робочої зони

Шкідлива речовина – це речовина, що контактуючи з організмом людини, може викликати захворювання чи відхилення у стані здоров'я як під час впливу речовини, так і в подальший період життя теперішнього і наступних поколінь

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Формальдегід	0,035	0,03	2
Фенол	0,01	0,01	3
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено: механічна вентиляція, регулярне прибирання та заборона заходити у приміщення в верхньому одязі.

7.2.3 Виробниче освітлення

Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 [68] Система природного освітлення відноситься до бокової. Характеристика зорових робіт – середньої точності.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 7.2:

Таблиця 7.2 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізювання	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 і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0	IV	б	середній	середній	200	500	4	1,5	2,4	0,9

При експлуатації штучного освітлення здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

Аналіз дії світла на організм людини й основних якостей зорового сприймання дозволяє сформулювати основні вимоги до виробничих приміщень, які полягають в забезпеченні достатньої освітленості робочих поверхонь,

рівномірності розподілення яскравості, відсутності глибоких і різких тіней, постійної освітленості в часі.

7.2.4 Виробниче 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 7.4 (відповідно ДБН В.2.5-28-2018 [66]):

Таблиця 7.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, Лк		КПО, %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	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) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 2) Система природного освітлення доповнюється загальним штучним освітленням, що створюється за допомогою лед-ламп.

7.2.5 Виробничий шум

Рівні шуму на робочому місці розробника встановлюються згідно ДСН 3.3.6.037-99 [67].

Під час аналізу підвищення продуктивності мультисервісної транспортної мережі при передаванні пакетного трафіку даних спостерігався шум непостійний тональний. Допустимі рівні звукового тиску під час виконання роботи повинні відповідати ГС, а рівні звуку L_A не повинні перевищувати 50 дБА (таблиця 7.5).

Таблиця 7.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку

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 доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

7.2.6 Виробничі випромінювання

Джерелом електромагнітного випромінювання під час виконання роботи є ПК.

У результаті дії ЕМП на людину можливі гострі та хронічні форми порушення фізіологічних функцій організму. Ці порушення виникають в результаті дії електричної складової ЕМП на нервову систему, а також на структуру кори головного та спинного мозку, серцево-судинної системи.

Допустимі значення параметрів електромагнітних випромінювань від монітору комп'ютера згідно СанПіН 2.2.4.1191-03 [62] наведені в табл. 7.6.

Таблиця 7.6 – 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

Для захисту людини від дії електромагнітних випромінювань передбачаються наступні способи і засоби: обмеження часу перебування персоналу в робочій зоні; встановлення раціональних режимів експлуатації установок і роботи працюючого персоналу.

7.2.7 Психофізіологічні фактори

Основними показниками важкості праці є: фізичне динамічне навантаження, стереотипні робочі рухи, статичне навантаження, переміщення у просторі. Основними показниками напруженості праці є: тривалість зосередження уваги або щільність сигналів, ступінь ризику для власного життя та життя інших осіб або ступінь відповідальності за життя інших осіб, змінність при роботі виключно в нічну зміну. [62]. Розглянемо деякі нормовані значення до яких потрібно прагнути при організації розпорядку робочого дня та режиму роботи відпочинку для досягнення оптимальних умов. Сенсорні навантаження:

Тривалість зосередження уваги до 50% від загального часу зміни.

Спостереження за екранами відеотерміналів, до 2 годин на зміну.

Монотонність виробничої обстановки, час пасивного спостереження за технологічним процесом менше 75 % від часу зміни.

Тривалість робочого дня 6-7 год.

Змінність роботи – однозмінна робота (без нічної зміни).

7.3 Організація оповіщення населення

Оповіщення організується згідно з Законом України «Про захист населення і територій від НС техногенного та природного характеру» (2000р.) та Положенням про організацію оповіщення і зв'язку в НС, затвердженого ПКМУ від 15.02.1992 р № 192. Організація оповіщення населення передбачає спочатку, за будь-якого характеру небезпеки, включення електросирен, переривчастий звук яких означає сигнал небезпеки “Увага всім!”. Для вирішення завдань оповіщення на всіх рівнях єдиної державної системи цивільного захисту створюються спеціальні системи централізованого оповіщення (СЦО). Системою оповіщення будь-якого рівня є організаційно-технічне об'єднання оперативного-чергових служб органів управління цивільного захисту, спеціальної апаратури управління та засобів оповіщення і каналів (ліній) зв'язку, які забезпечують передачу команд управління та мовної інформації в надзвичайних ситуаціях, і в особливий період. Системи централізованого оповіщення регіонального рівня є основною ланкою системи оповіщення в цілому. Саме з цього рівня планується організація централізованого оповіщення. Завданням СЦО регіонального рівня є оповіщення посадових осіб і сил даного рівня, органів управління, сил місцевого та об'єктового рівнів і їх посадових осіб, а також населення, яке проживає на території, на яку поширюється дія СЦО цього рівня.

Інформація, яка доводиться до органів управління і посадових осіб, носить оперативний характер, а до населення доводиться інформація про характер і масштаби загрози та про дії в умовах, які склалися. СЦО регіонального рівня мають забезпечувати як циркулярне, так і вибіркоче включення СЦО місцевого і об'єктового рівня. Передача сигналів та мовної інформації здійснюється

каналами зв'язку на основі їх перехоплення на час передачі сигналів і мовної інформації. Час перехоплення визначається технологічними характеристиками апаратури управління, на основі якої побудовано СЦО, і встановленою тривалістю передачі мовного повідомлення. Вищі ланки СЦО регіонального рівня встановлюються на робочих місцях оперативно-чергових служб територіальних органів управління за місцем їх постійного розташування та у позаміській зоні. Елементи комплексу СЦО середньої ланки встановлюються на місцевих підприємствах зв'язку (міжміські станції, міські і районні вузли (цехи) зв'язку).

Системи централізованого оповіщення місцевого рівня (місто, сільський район) забезпечують оповіщення посадових осіб даного рівня і органів управління об'єктового рівня, а також населення, яке проживає на території, яку охоплює система оповіщення цього рівня.

7.4 Висновки до розділу 7

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 програмно-керованих інфокомунікаційних систем та розробка дієвих заходів по підвищенню безпеки роботи цієї системи в умовах надзвичайних ситуацій.

ВИСНОВКИ

Досліджено особливості розробки апаратних технологій, необхідних для підготовки інфраструктури до майбутнього зсуву парадигми. Зокрема розглянуто накопичений досвід практичного застосування міліметрового діапазону, який сформував передумови для освоєння ТГц-діапазону – поки що хоча б кількох частотних смуг. Визначено, що комбінація міліметрового та терагерцового діапазонів забезпечить швидкість передачі даних у діапазоні Тбіт/с та доставку зображень з високою роздільною здатністю. Виявлено, що з появою нових спектрів, варіантів використання та апаратних технологій (таких як інтелектуальна поверхня) виникла гостра необхідність у розробці оновленої моделі каналу, яка може достатньо точно відображати поширення радіохвиль. Визначено апаратне забезпечення гетерогенна платформи на матеріалах типу III-V, яка зможе ще більше підвищити продуктивність кремнієвої системи за рахунок оптимізації кожного компонента на одному кристалі. При цьому, для досягнення більш високих характеристик в кремнієвий чіп можуть бути додані нові матеріали, такі як фотонні кристали, фотоелектричні елементи і плазмові поверхні. Нові конструкції антени на кристалі та в корпусі, поряд із технологією компактних лінз, такий як RIS, можуть забезпечити більш точну реалізацію бажаних характеристик антени, а також зменшити розмір системи. Розглянуто нові методи зв'язку та візуалізації на основі ТГц-технології, але реалізація терагерцових систем, заснованих на електроніці, оптоелектроніці та фотоніці, залежатиме від сценарію використання та робочих частот.

Досліджена інноваційна структура телекомунікаційних засобів, що використовує одночасно як спільний орбітальний кутовий момент, так і масивну архітектуру MIMO (багатообіцяюча технологія передачі для 6G), покращує продуктивність системи та забезпечує мультиплікативний вигравш ефективності використання спектра. Зрештою, оскільки закон Мура скоро перестане діяти, а кремнієва технологія наближається до фізичної межі, передбачається

фундаментальний стрибок обчислювальної потужності, який стане наслідком розвитку двох нових концепцій – нейроморфних та квантових обчислень.

В результаті виконання 6 розділу визначено витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G», які складають 457935,78 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень науково-економічного ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G» 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.

В ході виконання 7 розділу 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 програмно-керованих інфокомунікаційних систем та розробка дієвих заходів по підвищенню безпеки роботи цієї системи в умовах надзвичайних ситуацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. M. U. Khan, Y. Xing, Y. Ye, and W. Bogaerts, Photonic integrated circuit design in a foundry+ fabless ecosystem, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Article no. 8201014, 2019.
2. R. Helkey, A. A. Saleh, J. Buckwalter, and J. E. Bowers, High-performance photonic integrated circuits on silicon, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Article no. 8300215, 2019.
3. C. Zhang, S. Zhang, J. D. Peters, and J. E. Bowers, 8×8×40 Gbps fully integrated silicon photonic network on chip, *Optica*, vol. 3, no. 7, pp. 785–786, 2016.
4. T. Ting, Technology of liquid crystal based antenna, *Optics Express*, pp. 17138–17 153, 2019.
5. T. Singh and R. R. Mansour, Characterization, optimization, and fabrication of phase change material germanium telluride based miniaturized DC–67 GHz RF switches, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 8, pp. 3237–3250, 2019.
6. T. Singh and R. R. Mansour, Miniaturized reconfigurable 28 GHz PCM based 4-bit latching variable attenuator for 5G mmWave applications, in *Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. IEEE, 2020, pp. 53–56.
7. T. Singh and R. R. Mansour, Loss compensated PCM GeTe-based latching wideband 3-bit switched true-time-delay phase shifters for mmWave phased arrays, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, no. 9, pp. 3745–3755, 2020.
8. T. Baba, Photonic crystal devices for sensing, in *Proc. 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2019, pp. 1–2.
9. H. Wang, S. K. Gupta, B. Xie, and M. Lu, Topological photonic crystals: a review, *Frontiers of Optoelectronics*, pp. 1–23, 2020.
10. H. Hu, B. Huang, E. Zhao, and W. V. Liu, Dynamical singularities of floquet higher-order topological insulators, *Physical Review Letters*, vol. 124, no. 5, p. 057001, 2020.

11. E. O. Polat, G. Mercier, I. Nikitskiy, E. Puma, T. Galan, S. Gupta, M. Montagut, J. J. Piqueras, M. Bouwens, T. Durduran et al., Flexible graphene photodetectors for wearable fitness monitoring, *Science Advances*, vol. 5, no. 9, p. eaaw7846, 2019.
12. M. Zhang and J. T. Yeow, A flexible, scalable, and self-powered midinfrared detector based on transparent PEDOT: PSS/graphene composite, *Carbon*, vol. 156, pp. 339–345, 2020.
13. Y. Zhang and J. Mao, An overview of the development of antenna-inpackage technology for highly integrated wireless devices, *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 11, pp. 2265–2280, 2019.
14. D. Lee, H. Sasaki, H. Fukumoto, Y. Yagi, and T. Shimizu, An evaluation of orbital angular momentum multiplexing technology, *Applied Sciences*, vol. 9, no. 9, p. 1729, 2019.
15. E. O. Polat, G. Mercier, I. Nikitskiy, E. Puma, T. Galan, S. Gupta, M. Montagut, J. J. Piqueras, M. Bouwens, T. Durduran et al., Flexible graphene photodetectors for wearable fitness monitoring, *Science Advances*, vol. 5, no. 9, p. eaaw7846, 2019.
16. NTT DoCoMo, DOCOMO conducts worlds first successful trial of transparent dynamic metasurface, Tokyo, 2020.
17. M. Zhang and J. T. Yeow, A flexible, scalable, and self-powered midinfrared detector based on transparent PEDOT: PSS/graphene composite, *Carbon*, vol. 156, pp. 339–345, 2020.
18. M. Klemes, Reception of OAM radio waves using pseudo-doppler interpolation techniques: A frequency-domain approach, *Applied Sciences*, vol. 9, no. 6, p. 1082, 2019.
19. M. Hossain, N. Weimann, M. Brahem, O. Ostinelli, C. R. Bolognesi, W. Heinrich, and V. Krozer, A 0.5 THz signal source with 11 dBm peak output power based on InP DHBT, in *Proc. 2019 49th European Microwave Conference (EuMC)*. IEEE, 2019, pp. 856–859.

20. D. Kim and S. Jeon, A WR-3 band fundamental voltage-controlled oscillator with a wide frequency tuning range and high output power, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 7, pp. 2759–2768, 2019.

21. D. Kim and S. Jeon, A 300-GHz high-power high-efficiency voltagecontrolled oscillator with low power variation, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 5, pp. 496–499, 2020.

22. T. K. Johansen, M. Hossain, S. Boppel, R. Doerner, V. Krozer, and W. Heinrich, A 300 GHz active frequency tripler in transferred-substrate InP DHBT technology, in *Proc. 2019 14th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*. IEEE, 2019, pp. 180–183.

23. M. Hossain, S. Boppel, W. Heinrich, and V. Krozer, Efficient active multiplier-based signal source for 300 GHz system applications, *Electronics Letters*, vol. 55, no. 23, pp. 1220–1221, 2019.

24. M. H. Eissa and D. Kissinger, 4.5 A 13.5 dBm fully integrated 200-to255 GHz power amplifier with a 4-way power combiner in SiGe: C BiCMOS, in *Proc. 2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*. IEEE, 2019, pp. 82–84.

25. M. Ćwikliński, P. Brückner, S. Leone, C. Friesicke, R. Lozar, H. Maßler, R. Quay, and O. Ambacher, 190-GHz G-band GaN amplifier MMICs with 40 GHz of bandwidth, in *Proc. 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. IEEE, 2019, pp. 1257–1260.

26. L. John, A. Tessmann, A. Leuther, P. Neininger, and T. Zwick, Investigation of compact power amplifier cells at THz frequencies using InGaAs mHEMT technology, in *Proc. 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. IEEE, 2019, pp. 1261–1264.

27. H. Hamada, T. Tsutsumi, G. Itami, H. Sugiyama, H. Matsuzaki, K. Okada, and H. Nosaka, 300-GHz 120-Gb/s wireless transceiver with highoutput-power and high-gain power amplifier based on 80-nm InP-HEMT technology, in *Proc. 2019 IEEE BiCMOS and Compound semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS)*. IEEE, 2019, pp. 1–4.

28. H. Hamada, T. Tsutsumi, H. Matsuzaki, T. Fujimura, I. Abdo, A. Shirane, K. Okada, G. Itami, H.-J. Song, H. Sugiyama et al., 300-GHz-band 120-Gb/s wireless front-end based on InP-HEMT PAs and mixers, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 55, no. 9, pp. 2316–2335, 2020.
29. M. Tang, J.-S. Park, Z. Wang, S. Chen, P. Jurczak, A. Seeds, and H. Liu, Integration of III-V lasers on Si for Si photonics, *Progress in Quantum Electronics*, vol. 66, pp. 1–18, 2019.
30. I. Dan, G. Ducournau, S. Hisatake, P. Szriftgiser, R.-P. Braun, and I. Kallfass, A terahertz wireless communication link using a superheterodyne approach, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 32–43, 2019.
31. C. Castro et al., 32 GBd 16QAM wireless transmission in the 300 GHz band using a PINdiode for THz upconversion, in *Proc. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*. Optical Society of America, 2019.
32. I. Dan, P. Szriftgiser, E. Peytavit, J.-F. Lampin, M. Zegaoui, M. Zaknoune, G. Ducournau, and I. Kallfass, A 300-GHz wireless link employing a photonic transmitter and an active electronic receiver with a transmission bandwidth of 54 GHz, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 271–281, 2020.
33. X. Li, J. Yu, L. Zhao, W. Zhou, K. Wang, M. Kong, G.-K. Chang, Y. Zhang, X. Pan, and X. Xin, 132-Gb/s photonics-aided single-carrier wireless terahertz-wave signal transmission at 450 GHz enabled by 64QAM modulation and probabilistic shaping, in *Proc. Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2019, pp. M4F–4.
34. M. Faenzi, G. Minatti, D. Gonzalez-Ovejero, F. Caminita, E. Martini, C. Della Giovampaola, and S. Maci, Metasurface antennas: New models, applications and realizations, *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, pp. 1–14, 2019.
35. S. Moazeni, CMOS and plasmonics get close, *Nature Electronics*, vol. 3, no. 6, pp. 302–303, 2020.
36. W. Wang, X. Deng, L. Ding, and L. Zhang, *Brain-inspired intelligence and visual perception*. Springer, 2019.

37. S. Cui, L. Duan, B. Gong, Y. Qiao, F. Xu, J. Chen, and C. Wang, «EEG source localization using spatio-temporal neural network», *China Communications*, vol. 16, no. 7, pp. 131–143, 2019.

38. E. Musk et al., «An integrated brain–machine interface platform with thousands of channels», *Journal of Medical Internet Research*, vol. 21, no. 10, p. e16194, 2019.

39. C. Li and W. Zhao, «Progress in the brain–computer interface: An interview with Bin He», *National Science Review*, vol. 7, no. 2, pp. 480–483, 2020.

40. S. Sundaram, P. Kellnhofer, Y. Li, J.-Y. Zhu, A. Torralba, and W. Matusik, «Learning the signatures of the human grasp using a scalable tactile glove», *Nature*, vol. 569, no. 7758, pp. 698–702, 2019.

41. E. O. Polat, G. Mercier, I. Nikitskiy, E. Puma, T. Galan, S. Gupta, M. Montagut, J. J. Piqueras, M. Bouwens, T. Durduran et al., «Flexible graphene photodetectors for wearable fitness monitoring», *Science Advances*, vol. 5, no. 9, p. eaaw7846, 2019.

42. M. Zhang and J. T. Yeow, «A flexible, scalable, and self-powered mid-infrared detector based on transparent PEDOT : PSS/graphene composite», *Carbon*, vol. 156, pp. 339–345, 2020.

43. J. Shalf, The future of computing beyond Moore’s law, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 378, no. 2166, p. 20190061, 2020.

44. E. Charbon, Cryo-CMOS electronics for quantum computing applications, in *Proc. ESSDERC 2019–49th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.

45. S. Schaal, A. Rossi, V. N. Ciriano-Tejel, T.-Y. Yang, S. Barraud, J. J. Morton, and M. F. Gonzalez-Zalba, A CMOS dynamic random access architecture for radio-frequency readout of quantum devices, *Nature Electronics*, vol. 2, no. 6, pp. 236–242, 2019.

46. H. Xie, Z. Qin, G. Y. Li, and B.-H. Juang, Deep learning enabled semantic communication systems, *arXiv preprint arXiv:2006.10685*, 2020.

47. J. Tong, H. Zhang, X. Wang, S. Dai, R. Li, and J. Wang, A soft cancellation decoder for parity-check polar codes, arXiv preprint arXiv:2003.08640, 2020.
48. B. Li, H. Zhang, and J. Gu, On pre-transformed polar codes, arXiv preprint arXiv:1912.06359, 2019.
49. M. C. Coşkun, G. Durisi, T. Jerkovits, G. Liva, W. Ryan, B. Stein, and F. Steiner, Efficient error-correcting codes in the short blocklength regime, *Physical Communication*, vol. 34, pp. 66–79, 2019.
50. A. Süral, E. G. Sezer, Y. Ertuğrul, O. Arikan, and E. Arikan, Terabits-per-second throughput for polar codes, in *Proc. 2019 IEEE 30th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops)*. IEEE, 2019, pp. 1–7.
51. X. Wang, H. Zhang, R. Li, J. Tong, Y. Ge, and J. Wang, On the construction of G Ncoset codes for parallel decoding, in *Proc. 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. IEEE, 2020, pp. 1–6.
52. L. Huang, H. Zhang, R. Li, Y. Ge, and J. Wang, AI coding: Learning to construct error correction codes, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 1, pp. 26–39, 2019.
53. L. Huang, H. Zhang, R. Li, Y. Ge, and J. Wang, Reinforcement learning for nested polar code construction, in *Proc. 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
54. P. Trifonov, On construction of polar subcodes with large kernels, in *Proc. 2019 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*. IEEE, 2019, pp. 1932–1936.
55. E. Arikan, From sequential decoding to channel polarization and back again, arXiv preprint arXiv:1908.09594, 2019.
56. E. Bourtsoulatze, D. B. Kurka, and D. Gündüz, Deep joint source-channel coding for wireless image transmission, *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 5, no. 3, pp. 567–579, 2019.

57. C.-H. Lee, J.-W. Lin, P.-H. Chen, and Y.-C. Chang, Deep learning constructed joint transmission-recognition for internet of things, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 76 547–76 561, 2019.

58. H. Zhu, B. Smida, and D. J. Love, Optimization of two-way network coded HARQ with overhead, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 6, pp. 3602–3613, 2020.

59. A. Cohen, G. Thiran, V. B. Bracha, and M. Médard, Adaptive causal network coding with feedback for multipath multi-hop communications, in *Proc. 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2020, pp. 1–7.

60. A. Cohen, D. Malak, V. B. Brachay, and M. Medard, Adaptive causal network coding with feedback, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 7, pp. 4325–4341, 2020.

61. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

62. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14._nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html

63. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://vsegost.com/Catalog/31/31970.shtml>

64. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. – Мінбуд України. – К.: 2018

65. 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>

66. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

67. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_praop_0_00-7_15-18_01_ua.php Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

68. СанПіН 2.2.4.1294-03 «Фізичні фактори виробничого середовища. Гігієнічні вимоги до аероіонного складу повітря виробничих і громадських приміщень» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.ionization.ru/issue/iss5.htm>

69. ДСанПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/derz-nor4881.html>

70. СанПіН 2.2.4.1191-03 «Електромагнітні поля у виробничих умовах» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.vrednost.ru/2241191-03.php>

ДОДАТКИ

Додаток А
(Технічне завдання)

Додаток Б
(обов'язковий)

Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень

Додаток В
(обов'язковий)

Телекомунікаційні пристрої наступних поколінь

Додаток Г
(обов'язковий)

Схема віртуального телекомунікаційного пристрою

Додаток Д
(обов'язковий)

Ключові показники ефективності використання каналів в інфокомунікаційних
системах передавання

Додаток Е
(обов'язковий)

Схема кодування для систем передавання даних із швидкістю Тбіт/с

Додаток Є
(обов'язковий)

Схеми кодування SSCC та JSCC

Додаток Ж
(обов'язковий)

Схеми мережного кодування

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
АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОБІЛЬНИХ СИСТЕМ 6G
08-34.МКР.004.00.000 ТЗ

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

Виконавець: ст. гр. ТКС-21м
Климчук Б.С.

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 радіосистем за допомогою технічних і програмних засобів побудованих на основі технології 6G.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- розробка технічного завдання;
- аналіз апаратного забезпечення радіосистем та мереж;
- дослідження особливостей застосування нового телекомунікаційного обладнання;
- дослідження сучасних систем передавання ТГц-діапазону;
- особливості створення інноваційних телекомунікаційних пристроїв для систем 6G.
- дослідження методу продуктивного канального кодування радіосигналів в мережах 6G.

Об'єктом дослідження є пристрої та засоби мобільних систем 6G.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та математичні моделі, що дозволяють забезпечити високу продуктивність мобільних систем 6G.

Основними завданнями роботи є:

- техніко-економічне обґрунтування доцільності даної розробки;
- аналіз апаратного забезпечення радіосистем та мереж;

- сценарії використання нового телекомунікаційного обладнання;
- сучасні системи передавання ТГц-діапазону;
- інноваційні телекомунікаційні пристрої для систем 6G;
- 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 радіосистем.

3 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ МКР

Робота базується на результатах звіту з переддипломної практики «Апаратне забезпечення мобільних систем 6G», 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 H. Wang, S. K. Gupta, B. Xie, and M. Lu, Topological photonic crystals: a review, *Frontiers of Optoelec-tronics*, pp. 1–23, 2020.

3.3 H. Hamada, T. Tsutsumi, H. Matsuzaki, T. Fujimura, I. Abdo, A. Shirane, K. Okada, G. Itami, H.-J. Song, H. Sugiyama et al., 300-GHz-band 120-Gb/s wireless front-end based on InP-HEMT PAs and mixers, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 55, no. 9, pp. 2316–2335, 2020.

3.4 I. Dan, P. Szriftgiser, E. Peytavit, J.-F. Lampin, M. Zegaoui, M. Zaknourne, G. Ducournau, and I. Kallfass, A 300-GHz wireless link employing a photonic transmitter and an active electronic receiver with a transmission bandwidth of 54 GHz, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 271–281, 2020.

3.5 H. Xie, Z. Qin, G. Y. Li, and B.-H. Juang, Deep learning enabled semantic communication systems, arXiv preprint arXiv:2006.10685, 2020.

3.6 J. Tong, H. Zhang, X. Wang, S. Dai, R. Li, and J. Wang, A soft cancellation decoder for parity-check polar codes, arXiv preprint arXiv:2003.08640, 2020.

3.7 H. Zhu, B. Smida, and D. J. Love, Optimization of two-way network coded HARQ with overhead, IEEE Transactions on Communications, vol. 68, no. 6, pp. 3602–3613, 2020.

3.8 Dmytro V. Mykhalevskiy & Oksana S. Horodetska, 2019. "Investigation Of Wireless Channels According To The Standard 802.11 In The Frequency Range Of 5 Ghz For Two Subscribers," Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERC), Zibeline International Publishing, vol. 42(2), pages 50-57, March.

3.9 Михалевський Д. В. Розробка моделі оцінювання впливу архітектурних перешкод на основні параметри безпроводного каналу стандарту 802.11 / Д.В. Михалевський, О.С. Городецька // вчені записки тнУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2020. – том 31 (70) ч.1, №3 – с. 48-53.

3.10 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.

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

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

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

3.14 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 Климчук Б.С.

5 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Пропонується виконати дослідження способів підвищення продуктивності телекомунікаційних радіосистем за допомогою технічних і програмних засобів побудованих на основі технології 6G.

Технічні вимоги, яким повинна відповідати розробка, наступні:

- метод мультиплексування каналів в радіосистемі - ОАМ-МІМО;
- технологія побудови мобільної системи – 6G;
- швидкість передавання даних радіосистеми – 100 Гбіт/с;
- довжина радіолінії передавання – 10 м;
- носійна радіочастота – 300 ГГц;
- рівень потужності передавача – 0 дБм;
- чутливість приймача - -60 дБм;
- нормований коефіцієнт згасання лінії передавання – 10 дБ/км;
- коефіцієнт підсилення антенного обладнання – 30 дБ;
- коефіцієнт шуму – 15 дБ;
- коефіцієнт підсилення підсилювача – 15 дБ;
- формат модуляції - 32QAM;
- тип коду для каналу керування – полярний код;

- тип коду для каналу передавання даних – LDPC.

При розробці обладнання мобільних систем 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 апаратного забезпечення радіосистем та мереж	13.09.2022р.	19.09.2022р.	Проведений аналіз технологій	Вступ. Розділ 1.
3.	Сценарії використання нового телекомунікаційного обладнання	20.09.2022р.	07.10.2022р.	Проведений аналіз методів	Розділ 2
4.	Сучасні системи передавання ТГц-діапазону	08.10.2022р.	28.10.2022р.	Характеристики і параметри	Розділ 3
5.	Інноваційні телекомунікаційні пристрої для систем 6G	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 ОТ 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:

- схема віртуального телекомунікаційного пристрою;
- схема кодування для систем передавання даних із швидкістю Тбіт/с;
- схеми кодування SSCC та JSCC;
- схеми мережного кодування;
- економічна частина МКР;
- розділ ОП та БНС;
- рекомендації щодо подальшого використання телекомунікаційних пристроїв наступних поколінь.

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

- Регіональний Центр експлуатації телекомунікаційної мережі України шляхом впровадження технічних і програмних засобів побудованих на основі технології 6G;

- ПАТ “Укртелеком” шляхом впровадження пристроїв та засобів мобільних систем 6G.

Очікуваний техніко-економічний ефект. При впровадженні результатів досліджень очікується підвищення продуктивності телекомунікаційних радіосистем.

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:

- схему віртуального телекомунікаційного пристрою;
- схему кодування для систем передавання даних із швидкістю Тбіт/с;
- схеми кодування SSCC та JSCC;
- схеми мережного кодування;
- економічну частину та розділ БЖД і ЦЗ;
- рекомендації щодо подальшого використання телекомунікаційних пристроїв наступних поколінь.

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**

зва роботи: Апаратне забезпечення мобільних систем 6G

п роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

дрозділ кафедра інфокомунікаційних систем і технологій, факультет
формаційних електронних систем
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

ригінальність 99,39 % Схожість 0,61 %

аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

особа відповідальна за перевірку 
(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

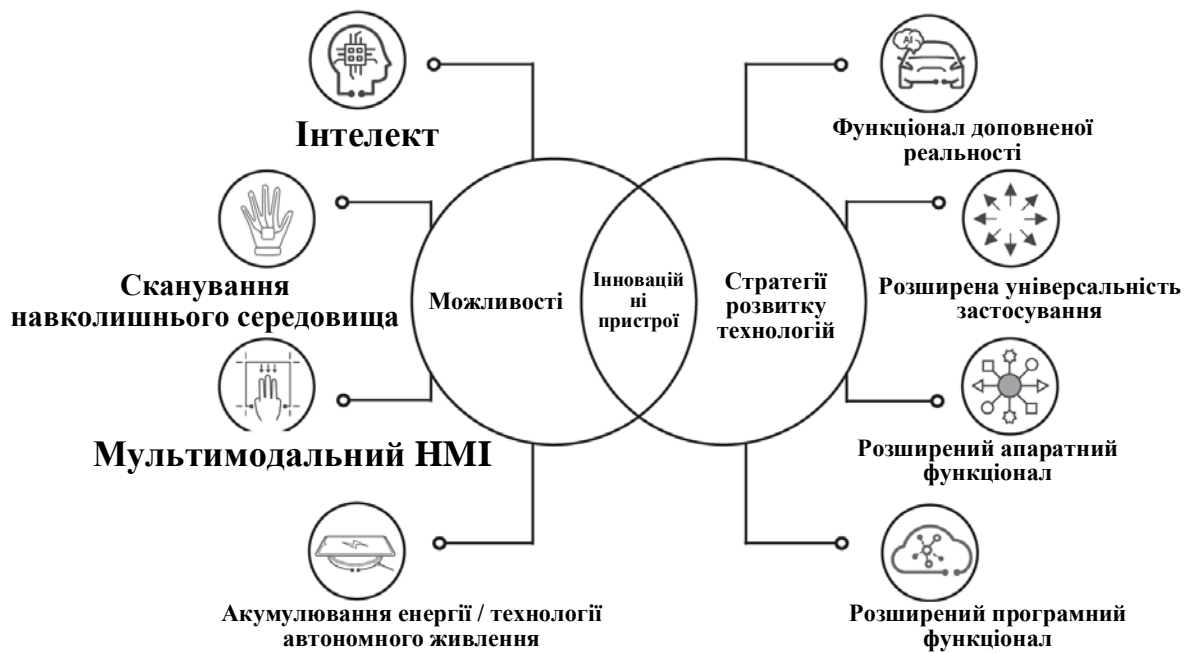
Знайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

автор роботи 
(підпис)

Климчук Б.С.
(прізвище, ініціали)

Сервісник роботи 
(підпис)

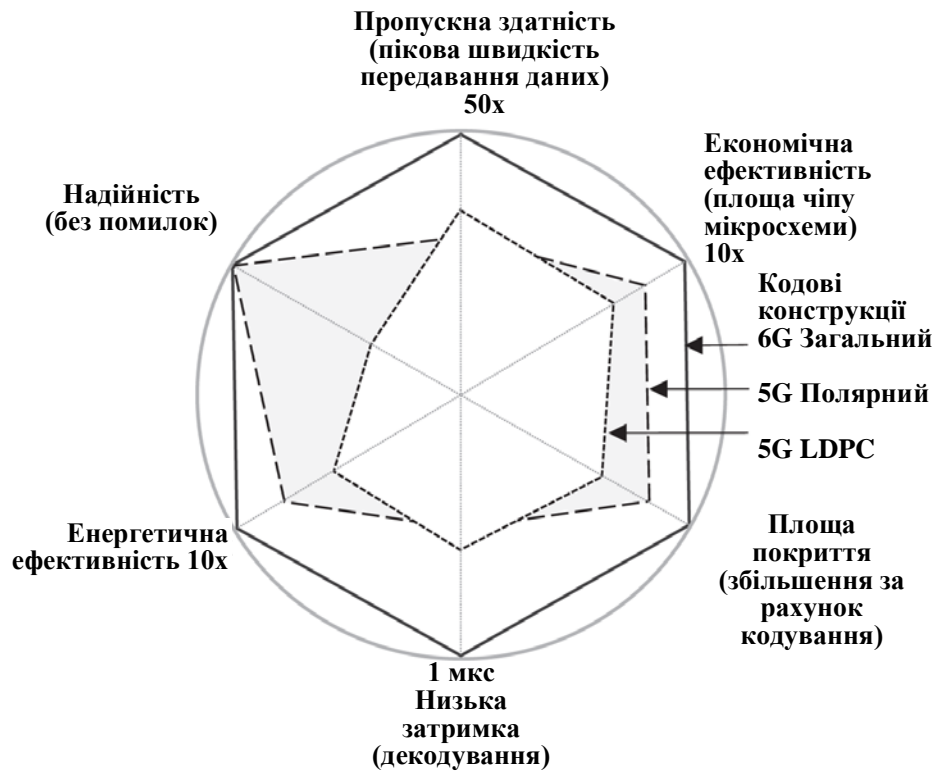
Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)



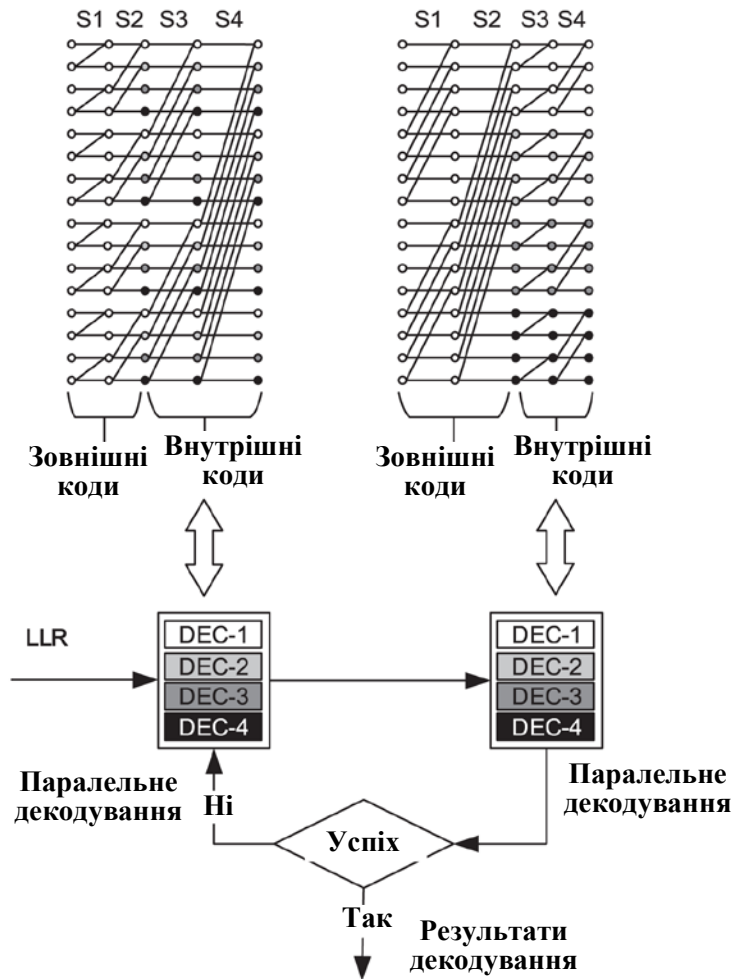
					08-34.МКР.004.00.001 Е8					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Телекомунікаційні пристрої наступних поколінь			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Климчук Б.С.							1	1
Перевір.		Васильківський М.В.								
Реценз.										
Н. Контр.		Васильківський М.В.								
Затверд.		Кичак В.М.			ВНТУ, гр. ТКС-21м					



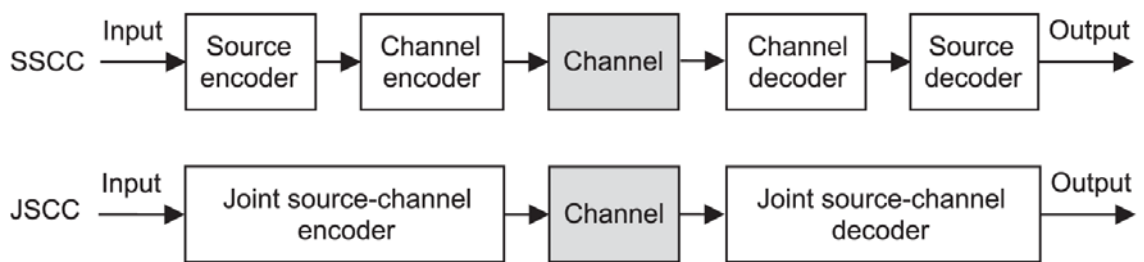
					08-34.МКР.004.00.002 Е8					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Схема віртуального телекомунікаційного пристрою			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Климчук Б.С.						1	1	
Перевір.		Васильківський М.В.								
Реценз.										
Н. Контр.		Васильківський М.В.						ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Затверд.		Кичак В.М.								



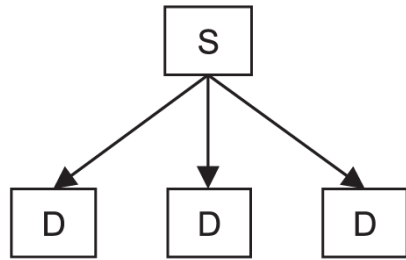
					08-34.МКР.004.00.003 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Климчук Б.С.			Ключові показники ефективності використання каналів в інфокомунікаційних системах передавання	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.						ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						



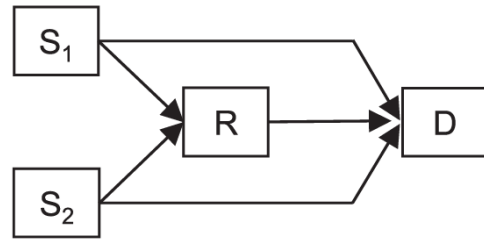
					08-34.МКР.004.00.004 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Климчук Б.С.			Схема кодування для систем передавання даних із швидкістю Тбіт/с	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.						ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.						
Затверд.		Кичак В.М.						



					08-34.МКР.005.00.004 Е8					
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Схеми кодування SSCC та JSCC					
Розроб.		Климчук Б.С.						Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.							1	1
Реценз.								ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Н. Контр.		Васильківський М.В.								
Затверд.		Кичак В.М.								



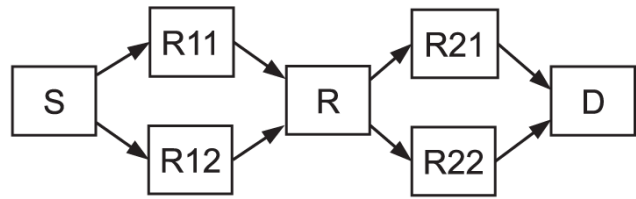
(a) Network coding for broadcast/groupcast/unicast communication



(b) One-way relay cooperative network coding



(c) Two-way relay communication network coding



(d) Multi-hop and cooperative network coding

					08-34.МКР.006.00.004 Е8			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Климчук Б.С.			Схеми мережного кодування	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Васильківський М.В.					1	1
Реценз.								
Н. Контр.		Васильківський М.В.				ВНТУ, гр. ТКС-21м		
Затверд.		Кичак В.М.						