

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бакалавр

Освітній рівень

Антенна МІМО для мобільних телефонів 5G

Назва теми

КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ

ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ

17 Електроніка та телекомунікації
Шифр і назва

СПЕЦІАЛЬНІСТЬ

172 Телекомунікації та радіотехніка
Шифр і назва

ОСВІТНЯ ПРОГРАМА

Телекомунікації та інформаційно-
комунікаційні технології

Виконав:

студент IV курсу, група ТР1-19-1


підпис

Андрій ДАЦИШИН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: д-р техн. наук, проф.


підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтроль:

канд. техн. наук, доцент


підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:

Зав. кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих
технологій та робототехніки:
д-р техн. наук, проф.


підпис

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, прізвище

« 14 » червня 2023р.

| | |
|-------------------|---|
| Факультет | інформаційних технологій |
| Кафедра | автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки |
| Освітній рівень: | бакалавр |
| Галузь знань: | 17 Електроніка та телекомунікації |
| Спеціальність: | 172 Телекомунікації та радіотехніка |
| Освітня програма: | Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології |

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру АКІТР

 Валерій МАРТИНЮК

« 01 » лютого 2023 р.





ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

ДАЦИШИНУ Андрію Володимировичу

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

- 1 Тема роботи: Антенa МІМО для мобільних телефонів 5G
- Керівник роботи: д.т.н., професор Мартинюк Валерій Володимирович
Затверджено наказом по університету від «01» березня 2023р. № 5
- 2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 03 червня 2023 року
- 3 Вихідні дані до роботи: схема технологічного процесу, технічне завдання
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
 - огляд еволюції мереж мобільного зв'язку;
 - ключові базові технології для мереж 5G та інших мереж;
 - антенa МІМО із збагаченням ізоляції для мобільної зв'язку 5G;
 - моделювання антени МІМО із збагаченням ізоляції
- 5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):
 - технічне креслення.

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

| Розділ | Прізвища, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---------------|---|---|---|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв |
| Нормоконтроль | КОРЕЦЬКА Людмила к.т.н., доцент |  |  |
| Антиплагіат | ФЕДУЛА Микола к.т.н., доцент |  |  |

7 Дата видачі завдання 01 лютого 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № п/п | Найменування виду роботи | Форма звітності, термін виконання | Відмітка наукового керівника |
|-------|--|-----------------------------------|------------------------------|
| 1. | Розробка завдання на кваліфікаційну роботу | 01.02.2023р. | виконано |
| 2. | Складання індивідуального плану на кваліфікаційну роботу | 05.02.2023р. | виконано |
| 3. | Написання першого (теоретичного) розділу | 10.03.2023р. | виконано |
| 4. | Написання другого розділу | 26.03.2023р. | виконано |
| 5. | Написання третього розділу | 15.04.2023р. | виконано |
| 6. | Написання четвертого розділу | 30.04.2023р. | виконано |
| 7. | Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційної роботи | 10.05.2023р. | виконано |
| 8. | Оформлення кваліфікаційної роботи | 15.05.2023р. | виконано |
| 9. | Рецензування кваліфікаційної роботи | 20.05.2023р. | виконано |
| 10. | Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційної роботи | 28.05.2023р. | виконано |

Здобувач


(підпис, дата)

Андрій ДАЦІШИН

Науковий керівник


(підпис, дата)

Валерій МАРТИНЮК

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Антенa MIMO для мобільних телефонів 5G»

Автор роботи: Дацишин Андрій Володимирович.

Керівник роботи: д.т.н., професор Мартинюк Валерій Володимирович.

Пояснювальна записка: 60 сторінок, 27 рисунків, 4 таблиці, 40 джерел.

Графічна частина: технічне креслення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: 5G, АНТЕНА MIMO, ІЗОЛЯЦІЯ, СЛОТ, КОЕФІЦІЄНТ КОРЕЛЯЦІЇ, КОЕФІЦІЄНТ ВІДБИТТЯ, ПАТЧ-ЕЛЕМЕНТ, МІЛІМЕТРОВІ ХВИЛІ, ЧАСТОТА.

Об'єктом дослідження є широкосмугова антенна решітка MIMO.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в підвищенні пропускнув здатності каналу та ефективності антени MIMO із збагаченням ізоляції для мобільних телефонів 5G.

У даній кваліфікаційній роботі представлена широкосмугова антенна решітка MIMO з вісьмома входами для смартфона п'ятого покоління з високим покращенням розділення елементів. Данна антенна решітка MIMO містить вісім E-подібних і перевернутих I-подібних прорізів на матеріалі з хорошою електро- та теплопровідністю. Щоб збільшити смугу пропускання, необхідні резонанси можна отримати, регулюючи E-подібні слоти. Крім того, щоб підсилити екранування елемента антенної системи MIMO, між кожним елементом антени введено односторонній проріз у формі ключа. У результаті всі елементи можуть покривати широку смугу частот із діапазоном частот від 3,3 ГГц до 6 ГГц. Ізоляція підвищується до 20 дБ за допомогою одностороннього слота у формі ключа, а ЕСС нижче 0,04 вимірюється між будь-якими двома елементами, які демонструють прийнятний імпеданс у характеристиках випромінювання дальньої зони.

03.06.2023 р.



ЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 4

СТУП 5

ОГЛЯД ЕВОЛЮЦІЇ СТАНДАРТІВ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 8

 1.1 Покоління 1G 8

 1.2 Покоління 2G 9

 1.3 Покоління 2.5G та 2.75G 9

 1.4 Покоління 3G 9

 1.5 Покоління 3.5G 10

 1.6 Покоління 4G 10

 1.7 Покоління 5G 11

 1.8 Покоління 6G 13

 1.9 Висновки до першого розділу 15

2 КЛЮЧОВІ БАЗОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ МЕРЕЖ 5G ТА ІНШИХ МЕРЕЖ 16

 2.1 Міліметрові хвилі 16

 2.2 Субміліметровий або терагерцовий діапазон 17

 2.3 Малі стільники або неоднорідні мережі 19

 2.4 Формування променя 19

 2.5 Архітектура центрального пристрою 21

 2.6 Повнодуплексна технологія 22

| | | | | | | | | |
|-----------|------|---------------|--------|----------|--|-------------------|------|---------|
| | | | | | КвРТР.2019006.01.06 ПЗ | | | |
| ин. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | Антенa МІМО для мобільних телефонів 5G | Літ. | Арк. | Акрушів |
| озроб. | | Дацишин А.В. | | 14.06.23 | | | | |
| еревір. | | Мартинюк В.В. | | 14.06.23 | Пояснювальна записка | | 2 | 64 |
| сценз. | | | | | | | | |
| І. Коитр. | | Корецька Л.О. | | 19.06.23 | | | | |
| атверд. | | Мартинюк В.В. | | 19.06.23 | | | | |
| | | | | | | ХНУ, гр. ТР1-19-1 | | |

| | | |
|--|--|----|
| 2.7 | Комунікація через видиме світло | 22 |
| 2.8 | Масивна система МІМО | 23 |
| 2.8.1 | Uplink передача | 26 |
| 2.8.2 | Downlink передача | 28 |
| 2.9 | Переваги масивної МІМО для мереж 5G і не тільки | 29 |
| 2.10 | Massive МІМО та мережі 5G..... | 30 |
| 2.11 | Висновки до другого розділу..... | 32 |
| 3 АНТЕНА МІМО ІЗ ЗБАГАЧЕННЯМ ІЗОЛЯЦІЇ ДЛЯ МОБІЛЬНОЇ | | |
| ЗВ'ЯЗКУ 5G..... | | |
| 3.1 | Антенна система МІМО | 33 |
| 3.2 | Конструкція МІМО антени | 39 |
| 3.3 | Висновки до третього розділу | 45 |
| 4 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ АНТЕНИ МІМО ІЗ ЗБАГАЧЕННЯМ | | |
| ІЗОЛЯЦІЇ | | |
| 4.1 | Алгоритм розв'язки системи МІМО | 46 |
| 4.2 | S-параметри | 48 |
| 4.3 | Коефіцієнт передачі | 49 |
| 4.4 | Показники ефективності діаграми випромінювання | 51 |
| 4.5 | Вплив на манеру поведінки рук і голови оператора | 52 |
| 4.6 | Висновки до четвертого розділу | 56 |
| ВИСНОВКИ..... | | 57 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ..... | | 58 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

| | | |
|-------|---|--|
| AMPS | – | Advanced Mobile Phone Systems – передові системи мобільних телефонів |
| CDMA | – | Code Division Multiple Access – множинний доступ з кодовим поділом |
| FDMA | – | множинний доступ з частотним поділом |
| GPRS | – | General Packet Radio Service – пакет радіопередачу |
| GSM | – | Global System for Mobile Communication – глобальна система мобільного зв'язку |
| IoT | – | Internet of Things |
| LAN | – | бездротові локальні мережі |
| LTE | – | Long Term Evolution |
| M2M | – | Machine-to-Machine Communication |
| MIMO | – | Multiple-Input Multiple-Output |
| SMS | – | Short Message Service |
| TDMA | – | Time Division Multiple Access – множинний доступ з тимчасовим поділом |
| UMTS | – | Universal Mobile Telecommunication Systems – універсальні мобільні телекомунікаційні системи |
| WiMAX | – | Worldwide Interoperability for Microwave Access – |

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КВРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 4 |

ВСТУП

З глобалізацією сучасні мережі стикаються з високими вимогами до трафіку, і для задоволення цих потреб стільникові системи розгортаються на відстані кількох сотень метрів, а бездротові локальні мережі (LAN) розміщуються майже всюди. Разом із розширенням послуг мобільного широкопasmового зв'язку впровадження нових концепцій, таких як Інтернет речей (Internet of Things – IoT) і міжмашинний зв'язок (Machine-to-Machine Communication – M2M), також сприяє збільшенню бездротового трафіку. Глобальне розгортання послуг стільникового зв'язку сприяє тому, що користувачі стільникових телефонів надзвичайно звикають до мобільних даних у своєму повсякденному житті. Такі послуги, як відеодзвінки, онлайн-ігри, додатки для соціальних мереж, такі як Facebook, Twitter, WhatsApp, кардинально змінили наше життя завдяки можливостям третього (3G), четвертого (4G) і п'ятого (5G) поколінь. мережах, як-от менша затримка та висока швидкість передачі даних [1]. Очікується, що в найближчі кілька років світ повного зв'язку з стільниковими телефонами буде характеризуватися, головним чином, зростанням кількості користувачів, підключенням, обсягом трафіку даних і широким спектром програм.

У найближчі кілька років такі технології, як доповнена реальність, віртуальна реальність, відео надвисокої чіткості, 3D-відео та такі функції, як мобільна хмара, стануть популярними, щоб збагатити максимальний досвід користувача. Очікується, що з 20219 по 2025 року трафік смартфонів зросте в десять разів, а загалом мобільний трафік збільшиться у вісім разів [2]. На рисунку 1 показано зростання трафіку мобільних даних і кількості підключених пристроїв з 20219 по 2025 рік [3]. До кінця 2025 року більше 90 відсотків трафіку буде надходити з мобільних телефонів. Цим колосальним обсягом мобільного трафіку даних складно керувати за допомогою можливостей систем попереднього покоління бездротових мереж.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 5 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

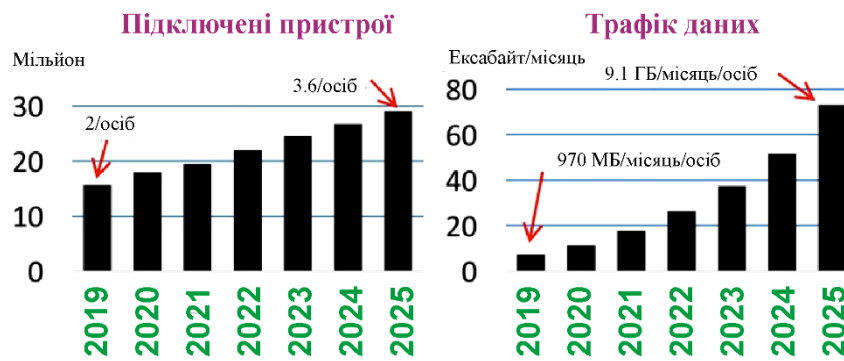


Рисунок 1 – Глобальний трафік мобільних даних і зростання підключених пристроїв з 2019 по 2025 рік

Основна проблема, пов'язана з поточним розвитком бездротової мережі, полягає в тому, що вона залежить або від збільшення пропускної здатності (спектру), або від ущільнення комірок для досягнення необхідної пропускної здатності зони. Ці ресурси є рідкісними і досягають точки насичення протягом кількох років. Крім того, збільшення пропускної здатності або ущільнення комірок збільшує вартість апаратного забезпечення та збільшує затримку. Третій фактор, який може підвищити пропускну здатність зони, тобто спектральна ефективність, залишився здебільшого недоторканим і незмінним під час цього швидкого розвитку та зростання бездротової мережі. Ефективна технологія бездротового доступу, яка може збільшити пропускну здатність бездротової зони без збільшення смуги пропускання або ущільнення комірки, є важливою для задоволення постійних вимог, з якими стикаються оператори бездротового зв'язку.

Масивний множинний вхід і множинний вихід (Multiple-Input Multiple-Output MIMO) – це найбільш захоплююча технологія бездротового доступу для задоволення потреб 5G і інших мереж. Масив MIMO є розширенням технології MIMO, яка передбачає використання сотень і навіть тисяч антен, підключених до базової станції, для підвищення спектральної ефективності та пропускної здатності. Ця технологія об'єднує антени, радіостанції та спектр, щоб

забезпечити більшу пропускну здатність і швидкість для вхідної мережі 5G [4,5]. Здатність масивного МІМО збільшити пропускну здатність і спектральну ефективність зробила його вирішальною технологією для нових бездротових стандартів [6,7]. Ключовим тут є значне підсилення масиву, яке досягає масив МІМО за допомогою великої кількості антен [8]. Масив МІМО є ключовою технологією для мереж 5G і інших мереж, і оскільки інтелектуальна система зондування в основному покладається на роботу мереж 5G і інших мереж, масивна МІМО та інтелектуальна система зондування нерозривно пов'язані.

Збір даних із великою кількістю інтелектуальних датчиків за допомогою традиційних схем багаторазового доступу є дуже непрактичним, оскільки це призводить до надмірної затримки, низької швидкості передачі даних і зниження надійності. Масив МІМО з величезним коефіцієнтом мультиплексування та можливостями формування променя може сприймати дані з одночасної передачі датчиків із значно меншою затримкою та надавати датчикам вищу швидкість передачі даних і надійне підключення. Масивні системи МІМО відіграватимуть вирішальну роль, дозволяючи передавати інформацію, зібрану за допомогою інтелектуальних датчиків, у режимі реального часу до центральних місць моніторингу для застосування розумних датчиків, таких як автономний транспортний засіб, дистанційна охорона здоров'я, розумні мережі, розумні антени, розумні магістралі, розумні будівлі та інтелектуальний моніторинг довкілля.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 7 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

1 ОГЛЯД ЕВОЛЮЦІЇ СТАНДАРТІВ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Епоха мобільного зв'язку розпочалася на початку 1980-х років, і відтоді за останні кілька десятиліть мобільний зв'язок пережив величезний розвиток. Стільникові мережі еволюціонували від 1G до 5G і далі. Усі стільникові мережі складаються з базових станцій, обладнання користувача (телефонів) і базових мереж. Еволюція від 1G до 6G узагальнено на рисунку 1.1.

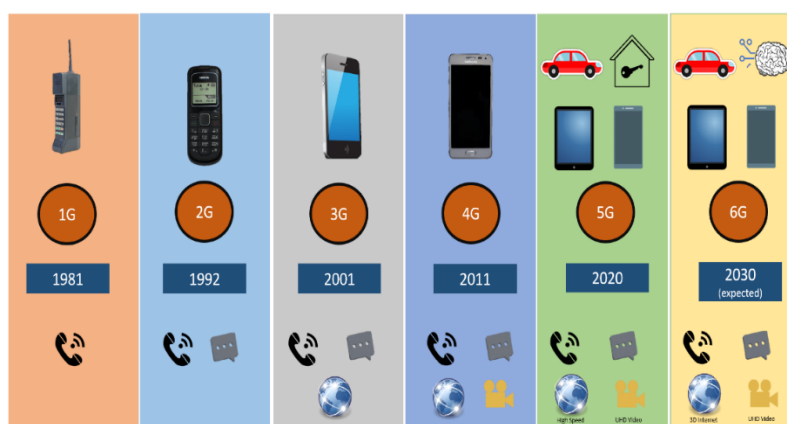


Рисунок 1.1 – Еволюція мобільного зв'язку від 1G до 5G

1.1 Покоління 1G

Мобільні мережі 1G були представлені на початку 1980-х років і використовували аналогові сигнали лише для голосових послуг. Системи 1G використовували множинний доступ з частотним поділом (FDMA) і пропонували швидкість передачі даних до 2,4 Кбіт/с. Вони мали погану якість голосу через сильні перешкоди. Системи 1G включали передові системи мобільних телефонів (Advanced Mobile Phone Systems – AMPS), система зв'язку загального доступу (Total Access Communication System – TACS) і Скандинавська система зв'язку (Nordic Communication System – NMTS) [4].

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 8 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

1.2 Покоління 2G

Мобільні мережі другого покоління (2G) були представлені на початку 1990-х років і зазвичай вважалися цифровими версіями мереж 1G. Разом із голосовими послугами вони дозволили службу коротких повідомлень (Short Message Service – SMS) і базові служби електронної пошти. Ці системи використовували множинний доступ з кодовим поділом (Code Division Multiple Access – CDMA) і множинний доступ з тимчасовим поділом (Time Division Multiple Access – TDMA) і пропонували швидкість передачі даних від 14,4 до 64 кбіт/с. Системи 2G включали глобальну систему мобільного зв'язку (Global System for Mobile Communication – GSM) і IS-95 CDMA. Мережі 2G мають обмежену мобільність і апаратні можливості [1].

1.3 Покоління 2.5G та 2.75G

Технологія 2G постійно вдосконалювалася, щоб забезпечити кращу швидкість передачі даних і послуги, і таким чином були представлені мережі 2,5G зі швидкістю передачі даних до 384 Кбіт/с. Системи 2.5G включали загальну пакетну радіопередачу (General Packet Radio Service – GPRS), розширену передачу даних GSM (Enhanced Data GSM Evolution – EDGE) і CDMA2000.

1.4 Покоління 3G

Мобільні мережі 3G були представлені на початку 2000-х років і базувалися на GSM і CDMA. Ці системи пропонували перегляд веб-сторінок на мобільних телефонах разом із послугами голосу, підтримки мультимедійних

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 9 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

повідомлень (Multimedia Message Support – MMS) і SMS. Системи 3G включали універсальні мобільні телекомунікаційні системи (Universal Mobile Telecommunication Systems – UMTS) і WCDMA. Смартфони стали популярними в середині 2000-х років. Мережі 3G забезпечували швидкість передачі даних понад 384 Кбіт/с, але вони вимагали великої пропускної здатності та складної інфраструктури.

1.5 Покоління 3.5G

Через постійний попит на більш високі швидкості передачі даних, високошвидкісний пакетний доступ до низхідної лінії зв'язку (High-Speed Downlink Packet Access – HSDPA), високошвидкісний пакетний доступ до висхідної лінії зв'язку (High-Speed Uplink Packet Access – HSUPA) і високошвидкісний пакетний доступ (High-Speed Packet Access – HSPA+) були введені в мережі 3G для збільшення швидкості передачі даних. Ці типи мереж називали мережами 3,5G, і вони забезпечували швидкість передачі даних до 2 Мбіт/с. Хоча 3.5G забезпечував більш високу швидкість передачі даних, реалізація та обладнання були дорогими, а сумісність з 2G була дуже складною [1].

1.6 Покоління 4G

Мобільні мережі 4G були представлені на початку 2010-х років. Мережі 4G пропонують швидкість передачі даних до 100 Мбіт/с і можуть обробляти більше трафіку даних із кращою якістю обслуговування (quality of service – QoS). Мережі 4G включають такі програми, як відеоконференції, онлайн-ігри та мобільне телебачення. Системи 4G включають всесвітню сумісність для

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 10 |

мікрохвильового доступу (Worldwide Interoperability for Microwave Access – WiMAX), довгострокову еволюцію (Long Term Evolution – LTE) і LTE-Advanced (LTE-A), і вони мають можливу сумісність з мережами старого покоління [2]. Смуги частот 4G є досить дорогими, і для роботи в мережах 4G потрібні мобільні телефони високого класу з підтримкою 4G [2].

1.7 Покоління 5G

Мобільні мережі 5G наразі починають впроваджуватись і мають на меті бути в 100 разів швидшими за поточні мережі 4G. Мережі 5G пропонуватимуть швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с, низьку затримку (у мілісекундах) і більшу надійність. Уявіть, що фільм у форматі HD можна завантажити всього за кілька секунд. Ця технологія може підтримувати багато пристроїв із підтримкою Інтернету речей (IoT) та інтелектуальних транспортних засобів, як показано на рисунку 1.2. Ефективна технологія бездротового доступу, яка може збільшити пропускну здатність без збільшення пропускну здатності чи ущільнення стільникового зв'язку, є важливою для задоволення постійних вимог, що постають перед 5G. Деякі з значних переваг 5G:

- Швидкість передачі даних: мережа 5G забезпечить швидкість передачі даних до 10 Гбіт/с, що майже в сто разів краще, ніж мережі 4G.
- Затримка: мережа 5G забезпечує затримку лише 1 мс порівняно з затримкою 10 мс, що надається мережами 4G.
- Ефективна передача сигналів: мережі 5G забезпечують ефективну передачу сигналів для підключення до IoT і зв'язку M2M.
- Взаємодія з користувачем: 5G покращує доповнену реальність, віртуальну реальність і штучний інтелект.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 11 |

- Спектральна ефективність: 5G забезпечить у десять разів більше спектральної та мережевої ефективності порівняно з мережами 4G.
- Енергоефективність: мережі 5G забезпечують на 90% ефективніше використання енергії мережі порівняно з мережами 4G.
- Повсюдне з'єднання: 5G забезпечує величезну кількість даних для трансляції, які можуть підтримувати понад 65 000 з'єднань, що в сто разів більше, ніж мережі 4G.
- Термін служби батареї: 5G забезпечує майже десять років автономної роботи для малопотужних пристроїв IoT.



Рисунок 1.2 – Фактори, що сприяють більшому збільшенню трафіку бездротових даних

Разом із величезними перевагами технологія 5G має певні труднощі. Деякі з викликів для технології 5G:

- Діапазони частот: для мереж 5G розглядаються діапазони частот до 300 ГГц. Ці високочастотні діапазони дорогі, і операторам бездротового зв'язку доведеться заплатити мільйони, щоб отримати цей високочастотний спектр.
- Покриття: високочастотна хвиля має меншу довжину хвилі; таким чином, він не може подорожувати на більшу відстань. Через цю проблему має

| | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|-------------------------|------|
| | | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | 12 |

бути більше базових станцій на меншій території, щоб забезпечити кожному користувачеві надійне з'єднання. Додаткова базова станція збільшує вартість і ускладнює загальну мережу.

- Вартість: оскільки 5G – це не просто додавання додаткового рівня до мережі 4G, вартість створення системи з базового рівня є непомірно високою.

- Підтримка пристроїв: оскільки телефони, доступні на поточному ринку, не підтримують інфраструктуру 5G, для виробників пристроїв буде складно розробити дешевший телефон, який підтримує 5G.

- Безпека та конфіденційність. Незважаючи на те, що 5G використовує систему автентифікації та ключової угоди (Key Agreement – АКА), вона все ще захищена від атак, таких як атака посередника, відстеження місцезнаходження та прослуховування.

- Доступність: із запровадженням М2М та ІоТ перевантаження та перевантаження мережі стануть серйозною проблемою в майбутньому. Ці виклики мережі радіодоступу ускладнять зробити мережу доступною для всіх.

- Кіберзлочинність: з високою швидкістю даних Кіберзлочинність різко зросте. Таким чином, для запобігання цим атакам були б необхідні суворі кіберзакони.

1.8 Покоління 6G

Мобільні мережі 6G є повними бездротовими мережами без обмежень. На даний момент мережа 6G знаходиться на стадії розробки і забезпечить неймовірну швидкість передачі в терабітному діапазоні. Ця технологія потребує інтелектуальної антени, великої пам'яті в мобільних телефонах і величезних оптичних мереж. Мережі 6G будуть безстійними, і це дозволить використовувати штучний інтелект у бездротових мережах. Незрозуміло, який

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 13 |

діапазон частот використовуватимуть мережі 6G, але очевидно, що для збільшення швидкості передачі даних, необхідної для мереж 6G, знадобиться значно вищий діапазон частот. У той час як 5G має використовувати частоту понад 30 ГГц і до 300 ГГц (міліметрові хвилі), 6G асоціюється з набагато вищою частотою в діапазонах ТГц (від 300 ГГц до 3 ТГц). Очікується, що використання ТГц спектру для 6G стане комерційним у найближчі 5–7 років. Деякі з додатків для мереж 6G – це підключена робототехніка та автономні системи, бездротові інтерфейси «мозок-комп'ютер», технологія блокчейн, мультисенсорна розширена реальність, космічні подорожі, огляд морських визначних пам'яток, тактильний Інтернет і промисловий Інтернет. Очікується, що мережі 6G будуть представлені в 2030 році. Деякі з переваг мереж 6G:

- Швидкість передачі даних: очікується, що мережа 6G забезпечить швидкість передачі даних до 10 Тбіт/с, що майже в сто разів краще, ніж мережі 5G.

- Затримка: мережа 6G забезпечить затримку лише 0,1 мс порівняно з затримкою 1 мс, яку забезпечують мережі 5G.

- Ефективна передача сигналів: мережі 6G забезпечують ефективну передачу сигналів для масового підключення IoT і зв'язку M2M.

- Взаємодія з користувачем: 6G покращує розширену реальність, доповнену реальність, віртуальну реальність і штучний інтелект.

- Спектральна ефективність: 6G забезпечить у десять разів більше спектральної та мережевої ефективності порівняно з мережами 5G.

- Енергоефективність: мережі 6G забезпечують у 100 разів ефективніше використання енергії мережі порівняно з мережами 5G.

- Повсюдне з'єднання: 6G забезпечить величезну кількість даних мовлення, які можуть підтримувати понад 1 мільйон з'єднань, що майже в сто разів більше, ніж мережі 5G.

| | | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|--|-------------------------|------|
| | | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | | 14 |

У таблиці 1 показано порівняння функцій мереж 4G, 5G і 6G.

Таблиця 1.1 – Характеристики мереж 6G

| Індекс ефективності | 4G | 5G | 6G |
|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Пікова швидкість передачі даних | 100 Mbps | 10 Gbps | до 10 Tbps |
| Затримка | 10 ms | 1 ms | до 0.1 ms |
| Щільність з'єднання | 0.1 млн пристроїв / км ² | 1 млн пристроїв / км ² | 10 млн пристроїв / км ² |
| Щільність з'єднання | 1× | 100 × 4G | 100 × 5G |
| Енергоефективність | 1× | 100 × 4G | 100 × 5G |
| Спектральна ефективність | до 6 ГГц | до 300 ГГц | до 3 ТГц |
| Доступний спектр | 200 м/г | 300 м/г | 600 м/г |
| Мобільність | Ні | Частково | Повністю |

1.9 Висновки до першого розділу

Отже, в даному теоретичному розділі було проведено огляд існуючих стабілізаторів струму для живлення світлодіодів. Наведено загальні показники потужних світлодіодів. Розглянуто будову та типи світлодіодів. Визначено, що найкращим джерелом постійного струму є імпульсний стабілізатор. Ціна такого драйвера вища, ніж у інших рішень, але точність у широкому діапазоні навантажень знаходиться в межах 3%, а ефективність перетворення перевищує 96%, це означає, що тільки 4% енергії витрачається марно і пристрій може працювати при високих температурах довкілля.

2 КЛЮЧОВІ БАЗОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ МЕРЕЖ 5G ТА ІНШИХ МЕРЕЖ

Останніми роками було запропоновано та проаналізовано багато передових ідей, щоб зробити мережі 5G та інші мережі реальністю. Основні ключові сприятливі технології, які розглядалися для систем 5G і 6G, включають міліметрові хвилі, малі комірки, формування променя, орієнтовану на пристрої архітектуру, повнодуплексну технологію, масив MIMO, терагерцову хвилю та спектр видимого світла, як показано на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Вісім ключових базових технологій для 5G та інших мереж

2.1 Міліметрові хвилі

Як правило, частота нижче 6 ГГц використовується для стільникового зв'язку, а частота вище – для інших послуг, таких як медична візуалізація, мікрохвильове дистанційне зондування, аматорське радіо, терагерцові обчислення та радіоастрономія. Значне збільшення трафіку даних призвело до

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 16 |

перевантаження радіочастотного спектру. У результаті пропускна здатність для користувача обмежена, що спричиняє повільніше та ненадійне з'єднання. Одним із способів вирішення цієї проблеми є використання частоти вище 6 ГГц для бездротового зв'язку. Частота вище 6 ГГц ніколи не використовувалася для бездротового зв'язку, і було проведено багато досліджень щодо трансляції міліметрових хвиль. Міліметрові хвилі мають частоту від 30 ГГц до 300 ГГц, і їх називають міліметровими хвилями, тому що їх довжина коливається від 1 до 10 мм порівняно з радіохвилями, які використовуються в поточній системі мобільного зв'язку, довжина яких становить десятки сантиметрів.

Багато аспектів міліметрових хвиль були опубліковані в останні кілька років [3, 4]. Автори в [5, 6] обговорюють потенціал і проблеми в технології міліметрових хвиль. Майбутнє мережі 5G з технологією міліметрових хвиль представлено в [6]. Міліметрові хвилі можуть забезпечити пропускну здатність у десять разів більшу, ніж у всьому стільниковому діапазоні 4G. Ці високочастотні хвилі використовуються в деяких супутникових програмах, але вони ніколи не використовувалися для мобільного широкосмугового зв'язку. Оскільки міліметр має нижчу довжину хвилі, вони не підходять для застосування на великій відстані. Ще одна проблема з міліметровими хвилями полягає в тому, що вони не можуть проникати через будівлі та перешкоди, і вони, як правило, поглинаються дощем.

2.2 Субміліметровий або терагерцовий діапазон

З глобалізацією поточний ринок бездротового зв'язку швидко розширюється. З огляду на розмови про мережі 6G, попит на більш високий спектр неминучий у найближчому майбутньому. Частота вище діапазону міліметрових хвиль (30 ГГц–300 ГГц) може використовуватися для бездротового

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 17 |

зв'язку. Діапазон частот від 300 ГГц до 3 ТГц відомий як терагерцовий діапазон. Хоча ця ідея є відносно новою, дослідження в цій галузі можуть бути корисними для індустрії бездротового зв'язку. Окрім вищого спектру, існує багато переваг ТГц-діапазону, таких як розгортання, яке не допускає перешкод, масштабованість, підвищена безпека, доступність спектру нового поля, низьке енергоспоживання, підсилення передньої лінії зв'язку для бездротової мережі, малий розмір антени та сфокусовані пучки [7].

Технологія ТГц-діапазону була б корисною для таких застосувань, як зображення, спектроскопія, голографічна телеприсутність, індустрія 4.0 і широкомасштабні комунікації. Існує кілька проблем і нових областей досліджень у розгортанні діапазону ТГц, таких як складна конструкція антени для підтримки більшого підсилення антени, специфікація та розгортання точки доступу, складна схема схеми, високі втрати при розповсюдженні та складне керування мобільністю [7]. Діапазони міліметрових і терагерцових хвиль показані на рисунку 2.2.

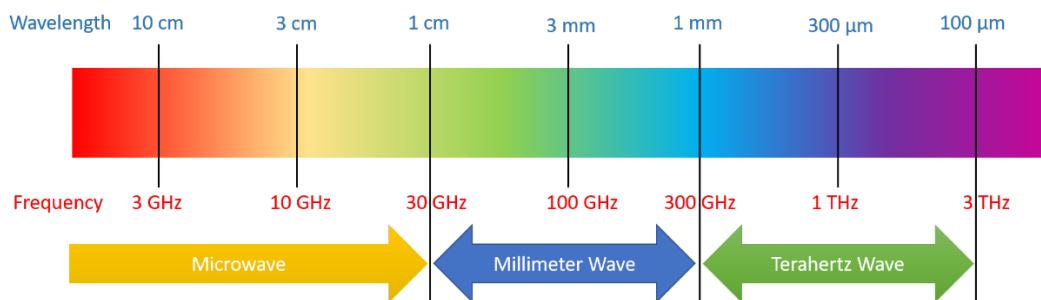


Рисунок 2.2 – Міліметровий і терагерцовий діапазон хвиль

Останніми роками з'явилася концепція надмасивної технології МІМО (UM-MIMO), яка використовує переваги плазмонних матеріалів для побудови антен і приймачів для досягнення пропускної здатності ТГц-діапазону. Такі матеріали, як графен і метаматеріали, можна використовувати для створення наноантен і трансиверів. Ці наноантени та трансивери можуть працювати в ТГц-

діапазоні [7]. UM-MIMO може використовувати переваги цих мініатюрних антен і приймачів для забезпечення більш високого просторового мультиплексування та формування променя. Таким чином, швидкість передачі даних і дальність зв'язку можуть бути покращені за допомогою просторового мультиплексування та формування променя. Щоб реалізувати ТГц UM-MIMO для мереж 5G і не тільки, потрібно багато досліджень. Деякі з проблем полягають у виготовленні плазмонних наноантенних решіток, оцінці каналу, попередньому кодуванні, виявленні сигналу, формуванні променя та бімстеінгу [7,8].

2.3 Малі стільники або неоднорідні мережі

Малі стільники (Small Cells) – це крихітні базові станції малої потужності, які можна розмістити на відстані кожні 100 м для покриття невеликих географічних територій. Ці базові станції малої потужності запобігають пропаданню сигналу в місцях скупчення людей. Дрібні стільники дуже легкі і маленькі; тому їх можна розмістити де завгодно. Якщо ми використовуємо міліметрові хвилі замість традиційного спектру нижче 6 ГГц, маленький стільник може стати ще меншим, і його можна встановити в крихітних місцях.

Малі стільники відіграватимуть важливу роль у забезпеченні високошвидкісного мобільного широкосмугового зв'язку та наднизької затримки для 5G. Малі стільники можна далі розділити на мікростільники, фемтостільники та пікостільники на основі зони покриття та кількості користувачів, які вони можуть підтримувати. Кілька досліджень малих стільників і їх переваг для мереж 5G розглядаються в [9].

2.4 Формування променя

Формування променя (beamforming) – це здатність базової станції адаптувати діаграму спрямованості антени [9]. Формування променя допомагає

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 19 |

базовій станції знайти відповідний маршрут для доставки даних користувачеві, а також зменшує перешкоди користувачам, які знаходяться поблизу, на маршруті, як показано на рисунку 2.3. Формування променя має кілька переваг для мереж 5G і не тільки. Залежно від ситуації технологія формування променя може бути реалізована кількома різними способами в майбутніх мережах. Для масивних систем MIMO формування променя допомагає підвищити ефективність спектру, а для міліметрових хвиль це допомагає підвищити швидкість передачі даних. У масивних системах MIMO базова станція може надсилати дані користувачеві з різних шляхів, і формування променя тут визначення рух пакетів і час надходження, щоб дозволити більшій кількості користувачів надсилати дані одночасно. Оскільки міліметрові хвилі не можуть проникати крізь перешкоди та не поширюються на більші відстані через меншу довжину хвилі, формування променя тут допомагає надсилати концентровані промені до користувачів. Таким чином, формування променя допомагає користувачеві отримувати потужний сигнал без перешкод іншим користувачам.

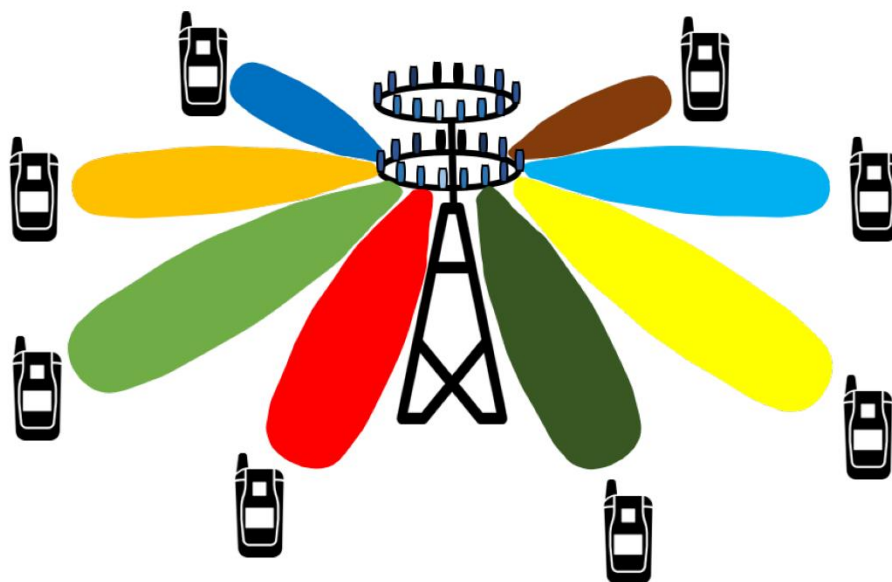


Рисунок 2.3 – Масивне формування променя з множинним виходом і множинним виходом (MIMO)

2.5 Архітектура центрального пристрою

Поточна система 4G спирається на архітектуру, орієнтовану на базову станцію, де пристрій покладається на з'єднання низхідної та висхідної лінії зв'язку, а також канал керування та передачі даних для отримання послуг від базової станції. Зі збільшенням кількості користувачів щільність стільникового зв'язку або щільність базових станцій швидко зростає, і це ущільнення в мережі вимагатиме серйозних змін у мережах 5G і поза ними. Крім того, з появою міліметрових хвиль багато частотних діапазонів із абсолютно різними характеристиками розповсюдження будуть співіснувати разом. Таким чином, архітектура, орієнтована на базову станцію, може перерости в архітектуру, центрального пристрою, у майбутніх мережах, щоб подолати такі проблеми, як ущільнення мережі та розширення діапазонів частот.

У центральній архітектурі пристрій користувача буде спілкуватися шляхом обміну інформацією через кілька різноманітних вузлів. Різноманітні дослідження переваг архітектури пристрою для мереж 5G представлені в Reference [23]. Типова архітектура пристрою показана на рисунку 2.4.

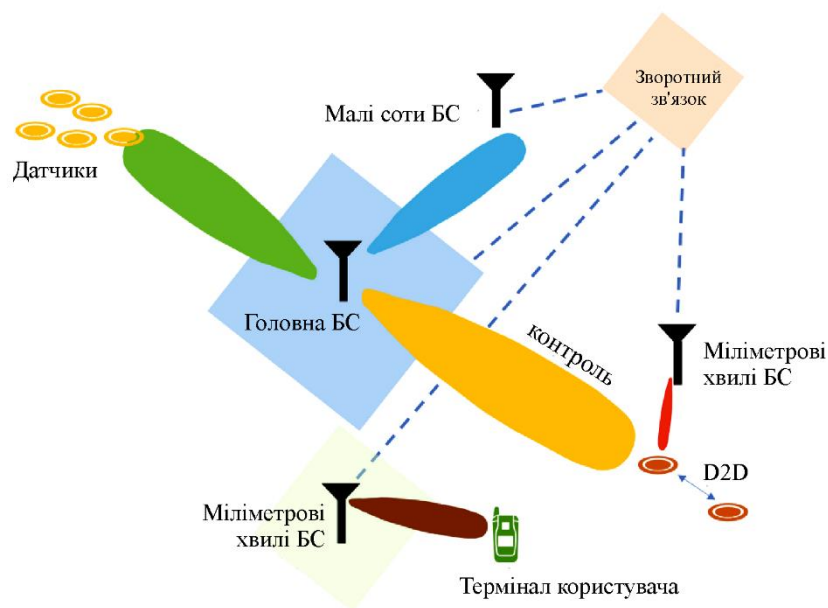


Рисунок 2.4 – Центральна архітектура пристрою

2.6 Повнодуплексна технологія

Як правило, бездротова передача та прийом не виконуються в однакових діапазонах частот, щоб уникнути перешкод. Таким чином, будь-яка двонаправлена система повинна розділяти висхідний і низхідний канали за допомогою часової або частотної області, щоб отримати ортогональні сигнали без перешкод. Повний дуплекс означає одночасну передачу та прийом в одному діапазоні частот і в той самий час, як показано на рисунку 2.5. Мережі 5G використовуватимуть повний дуплекс для передачі сигналів, щоб потенційно подвоїти пропускну здатність мережі, і це вигідно для вищих рівнів (наприклад, рівня МАС). Одним із недоліків повнодуплексної технології є те, що вона підсилює перешкоди сигналу, що викликає набридливе ехо. Було проведено кілька досліджень повнодуплексної технології та її переваг для мереж 5G [10].

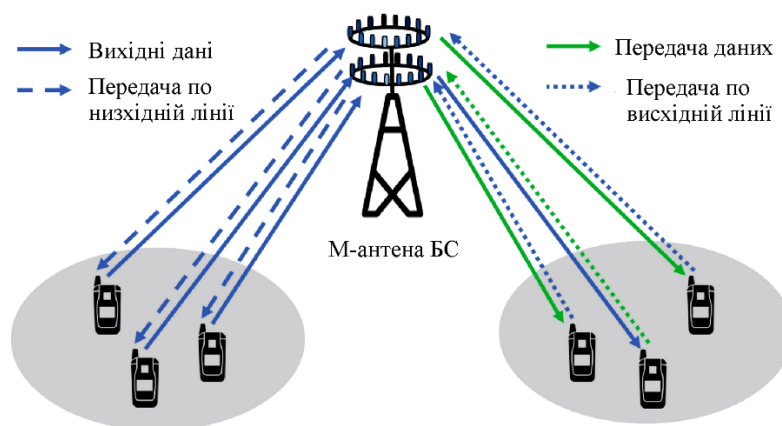


Рисунок 2.5 – Повнодуплексна технологія

2.7 Комунікація через видиме світло

Комунікація у видимому світлі (Visible Light Communication – VLC) забезпечує продуктивність, подібну до оптичного волокна, для мереж

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 22 |

майбутнього покоління. Він використовує видиме світло від 400 до 800 ТГц за допомогою люмінесцентних ламп або світлодіодів для передачі сигналу на меншу відстань. VLC можна створити з дуже недорогим апаратним забезпеченням, і він може використовувати переваги неліцензійної смуги. VLC не створює електромагнітного випромінювання, тому він не піддається зовнішньому електромагнітному випромінюванню. Оскільки для цієї технології потрібне джерело освітлення, ця технологія здебільшого корисна для застосування всередині приміщень. Стандарт для VLC був визначений у IEEE 802.15.7, але Проект партнерства третього покоління (3rd Generation Partnership Project – 3GPP) не розглядав його для стільникових мереж VLC був би дуже корисним для додатків розумного міста, і він був визнаний однією з ключових технологій для мереж 6G.

2.8 Масивна система MIMO

Системи MIMO є невід’ємною частиною сучасних бездротових систем, і в останні роки вони широко використовуються для досягнення високої спектральної та енергоефективності. До впровадження MIMO в основному використовувалися системи з одним входом і одним виходом, які мали дуже низьку пропускну здатність і не могли підтримувати велику кількість користувачів з високою надійністю. Щоб задовольнити цей величезний попит користувачів, різні нові технології MIMO, такі як MIMO для одного користувача (SU-MIMO), MIMO для багатьох користувачів (MU-MIMO) і мережевий MIMO були розроблені. Однак цих нових технологій також недостатньо, щоб задовольнити постійно зростаючі вимоги. За останні кілька років число користувачів бездротового зв’язку експоненціально зросло, і ці користувачі

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 23 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

генерують трильйони даних, які потрібно обробляти ефективніше з більшою надійністю.

Крім того, існують мільярди пристроїв Інтернету речей, які мають різні програми для інтелектуальної охорони здоров'я, розумних будинків і розумної енергетики, які сприяють трафіку даних. Передбачається, що до кінця 2023 року буде близько 50 мільярдів підключених пристроїв. Поточні технології MIMO, пов'язані з мережею 4G/LTE, не зможуть впоратися з цим величезним потоком трафіку даних з більшою швидкістю та надійністю. Таким чином, мережа 5G розглядає технологію MIMO як потенційну технологію для подолання проблеми, створеної масовим трафіком даних і користувачами. Було проведено кілька досліджень масових систем MIMO та їх переваг [11].

Масивна MIMO – це найпривабливіша технологія для 5G і поза межами ери бездротового доступу. Масивна MIMO є прогресом сучасних систем MIMO, що використовуються в сучасних бездротових мережах, які об'єднують сотні і навіть тисячі антен на базовій станції та обслуговують десятки користувачів одночасно. Додаткові антени, які використовує масив MIMO, допоможуть сфокусувати енергію в меншій області простору, щоб забезпечити кращу спектральну ефективність і пропускну здатність. Масивна низхідна лінія зв'язку MIMO та система висхідної лінії зв'язку показані на рисунку 2.6.

У міру збільшення кількості антен у масивній системі MIMO випромінювані промені стають вужчими та просторово сфокусованими на користувача. Діаграми спрямованості для різних конфігурацій антен показані на рисунку 2.7. Ці просторово сфокусовані промені антени збільшують пропускну здатність для потрібного користувача та зменшують перешкоди для сусіднього користувача. Масивна MIMO пропонує величезні переваги перед традиційною системою MIMO, які підсумовані в таблиці 2.1.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 24 |

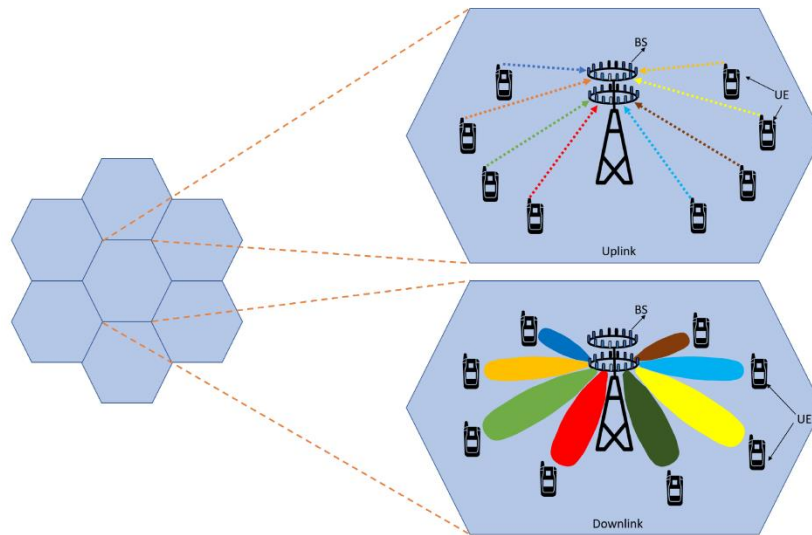


Рисунок 2.6 – Масивна MIMO uplink і downlink

Таблиця 2.1 – Порівняння традиційної системи MIMO та масивної системи MIMO

| | MIMO | Massive MIMO |
|---------------------------|-------------|---------------------|
| Кількість антени | ≤ 8 | ≥ 16 |
| Пілотне забруднення | Низьке | Високе |
| Пропускна здатність | Низьке | Високе |
| З'єднання антени | Низьке | Високе |
| Рівень бітових помилок | Високе | Низьке |
| Шумостійкість | Низьке | Високе |
| Розмаїття/приріст ємності | Низьке | Високе |
| Енергоефективність | Низьке | Високе |
| Вартість | Низьке | Високе |
| Складність | Низьке | Високе |
| Масштабованість | Низьке | Високе |
| Стабільність посилення | Низьке | Високе |
| Кореляція антени | Низьке | Високе |

детермінований пілот-сигнал для оцінки каналу $\in x \in C^N$, сигнал, отриманий на базовій станції під час висхідної лінії зв'язку, подається як:

$$y = H_x + n_{uplink}, \quad (2.1)$$

де $y \in C^M$ – сигнал, отриманий на базовій станції, H – вектор каналу між терміналом користувача та базовою станцією, а елементи $H \in C^{M \times N}$ є незалежними та однаково розподіленими з нульовим середнім і одиничною дисперсією, тобто $H \sim CM(0,1)$. Додатковий термін $n_{uplink} \in C^M$ – це додавання перешкод від кількох передач і шуму приймача. Додані перешкоди не залежать від сигналу користувача x , але можуть залежати від каналу H .

$$n_{uplink} = n_{uplink-перешкода} + n_{шум}. \quad (2.2)$$

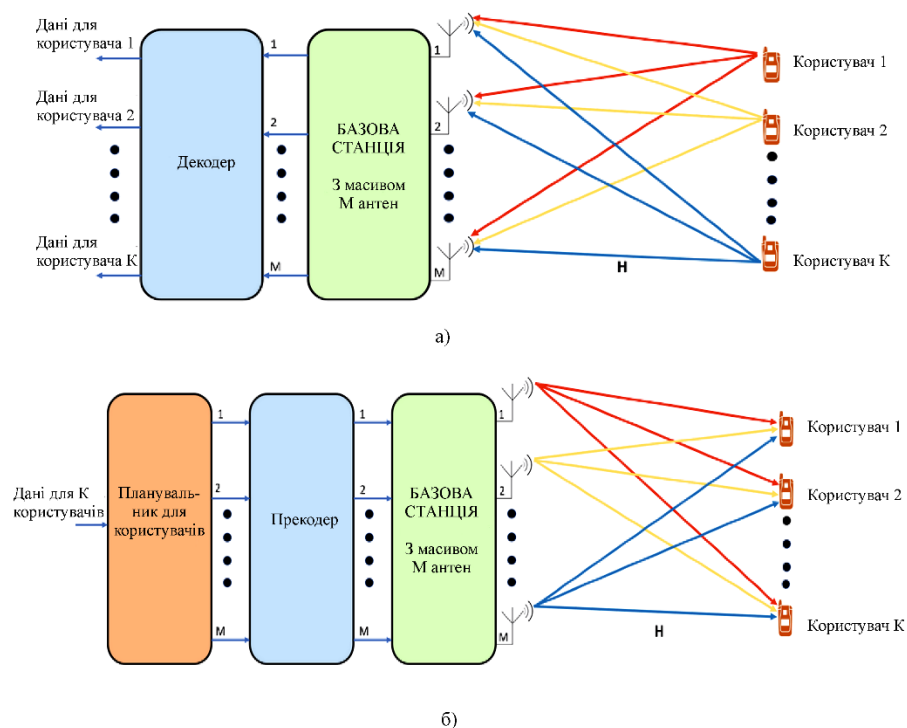


Рисунок 2.8 – Масивна робота висхідного та низхідного зв'язку MIMO.

а) Uplink б) Downlink

2.8.2 Downlink передача

Канал низхідної лінії зв'язку використовується для передачі даних або оцінки каналу між користувачем і базовою станцією. Базова станція використовує навчальні пілоти для оцінки каналу. Передача по низхідній лінії зв'язку з кількома UE (Обладнання користувача, User equipment – UE) і базовою станцією показана на рисунку 2.8, б. Розглянемо масивну систему MIMO низхідної лінії зв'язку, де базова станція оснащена M антенами, і вона обслуговує N користувачів, які мають одну антену одночасно. Базова станція надсилає незалежну інформацію кільком користувачам одночасно. Отриманий сигнал $y_k \in C^{M \times 1}$ для k -го користувача:

$$y_k = h_k x_k + n_{downlink}, \quad (2.3)$$

де h_k – канальний вектор між k -м користувачем і базовою станцією, елементи якого є незалежними та однаково розподіленими з нульовим середнім і одиничною дисперсією, тобто $h \sim CM(0,1)$. $x_k \in C^M$ – це сигнал, переданий базовою станцією для користувача k , а $n_{downlink}$ – це додатковий шум, який складається з шуму приймача $n_{noise} \sim CM(0, \sigma^2 I)$ та перешкод під час низхідної лінії зв'язку $n_{downlink-перешкода}$, викликаній одночасною передачею іншим користувачам і подається як:

$$n_{downlink} = n_{downlink-перешкода} + n_{шум}. \quad (2.4)$$

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 28 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

2.9 Переваги масивної MIMO для мереж 5G і не тільки

Ось деякі з переваг масової технології MIMO:

- **Спектральна ефективність:** масивна MIMO забезпечує вищу спектральну ефективність, дозволяючи антенній решітці фокусувати вузькі промені на користувача. Можна досягти спектральної ефективності, яка більш ніж у десять разів перевищує поточну систему MIMO, яка використовується для 4G/LTE.

- **Енергоефективність:** оскільки антенна решітка зосереджена на невеликій ділянці, вона потребує меншої випромінюваної потужності та зменшує потребу в енергії у масивних системах MIMO.

- **Висока швидкість передачі даних:** посилення масиву та просторове мультиплексування, що забезпечується масивним MIMO, збільшує швидкість передачі даних і пропускну здатність бездротових систем.

- **Відстеження користувачів:** оскільки масивний MIMO використовує вузькі промені сигналу до користувача; відстеження користувачів стає більш надійним і точним.

- **Низьке енергоспоживання:** масивний MIMO побудовано з лінійними підсилювачами надзвичайно низької потужності, що виключає використання громіздкого електронного обладнання в системі. Це споживання електроенергії можна значно зменшити.

- **Менше завмирання:** Велика кількість антен у приймачі робить масивний MIMO стійким до завмирання.

- **Низька затримка:** масивний MIMO зменшує затримку радіоінтерфейсу.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 29 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

- Надійність: масивні системи MIMO надійні проти ненавмисних перешкод і внутрішніх перешкод. Крім того, ці системи стійкі до відмови однієї або кількох антен через великі антени.

- Надійність: Велика кількість антен у масивній системі MIMO забезпечує більше посилення різноманітності, що підвищує надійність з'єднання.

- Покращена безпека: масивний MIMO забезпечує більшу фізичну безпеку завдяки ортогональним каналам мобільних станцій і вузьким променям.

- Низька комплексна лінійна обробка: більша кількість антен базової станції робить прості детектори сигналів і прекодера оптимальними для системи.

2.10 Massive MIMO та мережі 5G

Стандартизація 5G. Поточні системи MIMO не змогли впоратися з масовим напливом бездротового трафіку даних. З появою таких концепцій, як IoT, комунікація між машинами, віртуальна реальність і доповнена реальність, поточна система не може забезпечити необхідну спектральну ефективність. Нещодавні експерименти з масивною системою MIMO довели свою цінність, продемонструвавши рекордну спектральну ефективність. Дослідження, показало спектральну ефективність 145,6 біт/с/Гц для 22 користувачів, кожен з яких модулювався 256-квадратурною амплітудною модуляцією (256-QAM), на спільному радіоканалі 20 МГц на частоті 3,51 ГГц з 128 антен на базовій станції. Покращення спектральної ефективності було величезним у порівнянні з 3 біт/с/Гц, що є розширеною вимогою Міжнародного мобільного зв'язку (IMT) для 4G.

Ефективність роботи масивних систем MIMO підтверджено в різних середовищах, як у приміщенні, так і на вулиці. Було також доведено, що масивна

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 30 |

система MIMO забезпечує надійну роботу з низькою складністю радіочастотної та основної смуги частот. Апаратна реалізація масивної системи MIMO також була успішно випробувана, і було доведено, що ці системи можуть бути побудовані з дуже нескладним і недорогим апаратним забезпеченням як для цифрових базових, так і для аналогових радіочастотних кіл. Крім того, багато алгоритмів попереднього кодування, виявлення, планування та вирівнювання були розроблені для подальшого зниження вартості та потужності. Усі ці нові інновації та розробки в масивній MIMO сприяють привабливому розгортанню цієї технології, необхідної для бездротових мереж 5G і не тільки.

Масивна система MIMO вже реалізована в Китаї та Японії в контексті 4G LTE. SoftBank Group Corp. в Японії розгорнула масивну технологію MIMO у своїй мережі в 2016 році. У 2017 році Vodafone і Huawei разом провели реальний експеримент для тестування систем Massive MIMO і досягли швидкості 717 Мбіт/с. У 2018 році Nokia випустила легкий та енергоефективний чіпсет для масивної конструкції MIMO-антени, який отримав назву ReefShark. Цей чіпсет може зменшити масивний розмір антени MIMO вдвічі, і його вважають однією з перспективних технологій для розгортання масивної системи MIMO. Samsung також продемонструвала, що масивний MIMO може забезпечити одночасне високошвидкісне потокове відео без затримки в людному місці, експериментуючи на переповненому стадіоні в Південній Кореї. У січні 2019 року Sprint Mobile здійснив перший у світі дзвінок даних 5G з використанням 2,5 ГГц і Massive MIMO в комерційній мережі 3GPP 5G New Radio.

Теоретично системи Massive MIMO можуть мати нескінченну кількість антен на базовій станції. Але зазвичай від 64 до 128 використовуються практично в масивній базовій станції MIMO. Нещодавно Sprint Network, співпрацюючи з такими лідерами, як Ericsson, Nokia і Samsung Electronics, розгорнули масивні системи MIMO із 128 антенами (64 антени для прийому сигналу та 64 антени для

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 31 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

передачі сигналу). Однією з визначних переваг масивного MIMO є те, що нам потрібне лише складне обладнання на базовій станції, тоді як UE може мати одну антену та просту конструкцію антени. Таким чином, для масивної MIMO більша кількість антен потрібна лише на базовій станції, але не на UE. Сучасні смартфони мають від 2 до 4 антен. Сучасні смартфони мають від 2 до 4 антен, але для масивного MIMO буде достатньо мати лише одну антену на UE.

2.11 Висновки до другого розділу

Потреба в ефективному стільниковому спектрі, який міг би вмістити величезний сплеск бездротового трафіку даних, є неминучою. Масова технологія бездротового доступу MIMO є відповіддю на цей глобальний попит. Масивна технологія MIMO об'єднує антени як у передавача, так і в приймача для забезпечення високої спектральної та енергетичної ефективності за допомогою відносно простої обробки. Враховуючи світову потребу в ефективному спектрі, було проведено обмежену кількість досліджень масової технології MIMO. Таким чином, кілька відкритих дослідницьких завдань все ще перешкоджають цій новій технології бездротового доступу.

У даному розділі представлено огляд масивних систем MIMO, висвітлюючи ключові базові технології для мереж 5G і не тільки. Незважаючи на те, що масивна технологія MIMO пропонує величезні переваги для мереж 5G і 6G, все ще існують різні проблеми розгортання, такі як забруднення пілотного каналу, оцінка каналу, попереднє кодування, планування користувача, порушення апаратного забезпечення, енергоефективність і виявлення сигналу, які необхідно вирішити, перш ніж ми зможемо досягти її обіцяні переваги.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 32 |

3 АНТЕНА МІМО ІЗ ЗБАГАЧЕННЯМ ІЗОЛЯЦІЇ ДЛЯ МОБІЛЬНОЇ ЗВ'ЯЗКУ 5G

За останні кілька років феноменальне вдосконалення телекомунікацій виснажило потенціал існуючих систем мобільного зв'язку 4G. Нещодавно розроблені комунікаційні технології приділяють увагу забезпеченню високої пропускної здатності з мінімальними витратами часу та енергії [15]. Немає сумніву, що одним із ключових показників потенційного підключення до 5G буде швидкість передачі даних. Мерчандайзинг мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G), широкопasmового доступу до даних і розумних мобільних мереж наближається [16]. Проте є проблеми з технологією 5G; наприклад, високошвидкісний попит на бездротові мережі МІМО та широкопasmовий доступ необхідний для вирішення цієї проблеми, щоб підвищити пропускну здатність каналу та ефективність шляхом використання властивостей багатопроменевого поширення без зміни потужності на вході [17].

У порівнянні з традиційними мобільними телефонами мобільні телефони 5G віддають перевагу антенним системам МІМО, таким як 2-, 4-, 8-, 10- і 12-антенні системи. Крім того, система МІМО повинна володіти особливостями широкопasmового зв'язку та характеристиками ізоляції, щоб забезпечити хороші показники. Різні країни та оператори встановили різні діапазони частот для зв'язку 5G, як-от США з низькою та середньою смугою 3700 МГц – 4200 МГц і високою смугою 64 – 71 ГГц, Корея з високою смугою 26,5 ГГц – 29,5 ГГц, та Індія з низькою та середньою смугою 3400 МГц–3600 МГц і високою смугою 24,5 ГГц – 29,5 ГГц.

3.1 Антенна система МІМО

Широкопasmовий доступ є важливою функцією в додатках 5G для покриття цих діапазонів частот. Зрозуміло, що на ефективність антенної системи

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 33 |

МІМО негативно вплине взаємне з'єднання кожного елемента антени. Як наслідок, створення надійної антенної системи МІМО для покращення ізоляції елементів є проблемою. Більше того, інтегрувати таку систему МІМО в смартфонний телефон з обмеженою рамкою в просторі досить складно [18]. Незважаючи на те, що величезна антена 5G є набагато ефективнішою для підвищення ефективності спектру та швидкості передачі даних, встановлення кількох елементів у дуже обмеженому просторі мобільного телефону є непростим завданням.

Запропонована компактна антена на мікросхемі виготовлена на основі п'яти шарів, що містять металевий кремній. Верхній кремнієвий шар затиснутий двома дуже тонкими металевими шарами з алюмінію. Паралельні металеві шари, що закривають шар кремнію, перфоровані з періодичним розташуванням круглих отворів, а два зовнішні краї металевих шарів з'єднані один з одним металевими штифтами через шар кремнію для створення структури SIW (System Information for Windows) [19]. Верхній шар складається з масиву 2×4 прямокутних мідних плям. На патчах викарбуваний ряд круглих прорізів субхвильової довжини. Антена збуджується за допомогою безконтактного зв'язку на краю ділянки, що є аналогом ділянки зв'язку з розривом. Це досягається за допомогою мікросмушкової копланарної хвилеводної лінії живлення, яка створюється шляхом заземлення обох сторін поряд з лінією живлення. Лінія живлення затиснута між двома шарами оксиду кремнію, під якими знаходиться шар з алюмінієвими плямами, які відокремлені один від одного вузьким проміжком. Цей шар діє як частково відбиваюча поверхня [6]. За допомогою запропонованої методики ізоляція між випромінюючими елементами була покращена в середньому на 22,5 дБ порівняно з зразком антенної решітки без ізоляції SIW. Ефективність масиву була покращена завдяки перетворенню латки для демонстрації характеристик метаматеріалу. Це було

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 34 |

досягнуто шляхом вбудовування патч-антен в решітку з субхвильовими прорізами [20]. Показано, що згадані вище проблеми, що стосуються вбудованих антен, можна зменшити шляхом застосування двовимірної композитної право/лівосторонньої (composite right/left-handed – CRLH) метаматеріальної лінії передачі (transmission line – TL), відомої як концепція метаповерхні, у розробці антени [21]. Ефективність запропонованого методу, якщо порівнювати зі звичайними конструкціями вбудованої антени, показує покращення смуги пропускання імпедансу, підсилення випромінювання та ефективності [22].

Техніка розв'язки та процес зменшення антени стали основною вимогою для конструкції антени, щоб задовольнити вимоги добре упакованого макета антени та збільшити утеплення або ізоляцію. Однак більш екстремальний взаємозв'язок призведе до більш високих елементів антени та меншої відстані один до одного, тим самим погіршуючи продуктивність антенної системи МІМО [22]. Таким чином, зменшення взаємозв'язку є основною проблемою при розробці масиву МІМО [23, 24]. Щоб вирішити проблему поділу, було реалізовано кілька методів роз'єднання. Наприклад, для покращення ізоляції системи з великим зазором між кожним елементом антени використовували просторове рознесення та поляризаційне рознесення. Для створення восьмиантенної серії МІМО використовуються чотири компактні конструкції з двома антенами [15]. Разом із вісьмома елементами пропускна здатність каналу значно покращена, але ізоляція становить лише 10 дБ. Крім того, була досліджена мережа з шістнадцяти антен, яка підвищила пропускну здатність каналу до 71 біт/с/Гц [66]. Три лінії нейтралізації гарантують ізоляцію 10 dB. Монополістичний масив 2×2 МІМО з наземною структурою розв'язки досліджувався в [27]. Це охоплює високу ізоляцію (понад 20 дБ) і низьку смугу ЕССС (ENDA ECCC Configurable Current Converter) 22–248 ГГц (нижче 0,01). Тим часом була досліджена структура широкопasmової подвійної антени [19] з

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 35 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

використанням трьох ліній нейтралізації для забезпечення сегрегації, яка також прийнята в [20]. Щоб зменшити взаємний зв'язок у пристрої 2×2 МІМО до мінімуму, була використана структура електромагнітної забороненої зони (electromagnetic bandgap – EBG), а для зменшення взаємного зв'язку були використані додаткові резонатори або гібридні резонатори.

Показано, що ця методика ефективно зменшує взаємозв'язок між сусідніми елементами випромінювання, які інакше можуть підірвати підсилення випромінювання та діаграму спрямованості масивів. Периферія кожної накладки вбудована в круглі діелектричні слоти, які створені на основі концепції метаповерхні для підвищення радіаційного підсилення та ефективності [25].

Перевагами запропонованої методики є:

- простота;
- економічна ефективність, оскільки немає потреби в короткозамкнених наскрізних отворах або тривимірних металевих стінках;
- можливість модернізації існуючих антенних решіток [26].

Представлено ефективний метод придушення взаємного зв'язку між суміжними випромінювальними елементами, який базується на ізоляції метаповерхні для систем з декількома входами та декількома виходами (multiple-input multiple-output – МІМО) і радарів із синтетичною апертурою (synthetic aperture radar – SAR). Це досягається шляхом придушення хвиль поверхневого струму, індукованих над антеною, шляхом введення хрестоподібної метаповерхневої структури між випромінюючими елементами [27]. Дві патч-антени електромагнітно з'єднані через носій підкладки та простір над і під нею. Зв'язок на шарі підкладки відбувається за рахунок поверхневих хвиль, а зв'язок через повітря – через пряме ближнє поле «патч-патч» [28]. Один із двох зв'язків є більш домінуючим, що залежить від просторової геометрії конструкції антени. Пряме взаємне з'єднання між елементами патча можна контролювати

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 36 |

шляхом додавання додаткового непрямого з'єднувального шляху з використанням запропонованої структури ізоляції EBG-MTM [29]. Системи з декількома входами та декількома виходами (MIMO) забезпечують бездротовий зв'язок високої пропускної здатності без збільшення смуги пропускання сигналу або співвідношення сигнал/шум (signal-to-noise ratio – SNR). Це пов'язано з тим, що кілька потоків даних можна передавати одночасно за допомогою кількох антен (антенної решітки) на передавачі та приймачі [30]. Для реалізації компактних антен MIMO критичним завданням є мінімізація кореляції сигналу між антенами в широкому діапазоні частот. Коли кілька антен розташовано поруч, взаємозв'язок може погіршити характеристики випромінювання антен і пропускну здатність каналу систем MIMO [31].

У [17] між елементами антени було введено інвертований і заземлюючий слот з підсиленою сегрегацією елементів 20 dB. Елемент багатомодової розв'язки, подібний до дерева, був зареєстрований у [32], і була проведена широкопasmова ізоляція, але він все ще громіздкий і не має легких функцій налаштування; в принципі, через надзвичайно складну електромагнітну (electromagnetic – EM) настройку, багатомодовий резонатор мініатюрного розміру (елемент розв'язки) важко регулювати. Більшість мереж розв'язки є фільтруючого типу [11]. Отже, можна реалізувати режими багаторозв'язки, посилаючись на теорію архітектури багатомодового фільтра. Щоб досягти рознесення шаблонів, методологія, викладена в [33], використовує кільцевий слот, який забезпечує ізоляцію понад 15 дБ між портами більшого розміру ($80 \times 80 \text{ мм}^2$). Щоб підсилити розділення, між будь-якими двома радіаторами використовували різноманітні роз'єднувальні конструкції або різні заглушки. Щоб досягти діаграми та поляризаційного розмаїття, напрямки живлення з перпендикулярним розташуванням були застосовані в [29–32], де представлено

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 37 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

збагачення ізоляції за допомогою антенної решітки МІМО з вісьмома входами для розумної мобільної системи п'ятого покоління.

Е-подібні та перевернуті І-подібні прорізи були вирізані на металевій рамі для вивчення нових методів випромінювання в конструкції антени смарт-мобільного телефону МІМО, яка обмежена простором, на відміну від інших моделей, на які впливає обмежене радіаційне середовище металевої конструкції. Щоб покращити ізоляцію компонентів антенної системи МІМО, було запропоновано односторонній слот під гайковий ключ. Таким чином, виходить широкий спектр антенної системи МІМО, а ізоляція елемента становить приблизно 20, що може охоплювати більшу частину діапазону менше 6 ГГц. Як і в таблиці 3.1, запропонована антенна система МІМО п'ятого покоління перевершує рівень технологій у цій галузі.

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз

| Розмір антени | Метод розв'язки | Ізоляція | ЕСС | Ефективна смуга пропускання (ГГц) | Загальна ефективність (%) | Комплексність |
|---|--------------------------|----------|--------|-----------------------------------|---------------------------|---------------|
| <i>Запропонована модель</i> | | | | | | |
| 150 × 80 × 7 мм ³ (вісім елементів) | Заземлення | 20 | <0.04 | 3.3 ГГц–5.82 ГГц | 50–92 | Проста |
| <i>Існуючі моделі</i> | | | | | | |
| 150 × 75 × 7 мм ³ (вісім елементів) | Заземлення | >18 | <0.05 | 3.3 ГГц–6.0 ГГц | 40–90 | Комплексна |
| 17.4 × 6 × 0.8 мм ³ (одиночний елемент) | Ні | >19.6 | <0.013 | 3.0 ГГц–6.0 ГГц | 49–76.9 | Комплексна |
| 124 × 74 × 6 мм ³ (вісім елементів) | Гібридний метод | >15 | <0.15 | 3.3 ГГц–3.6 ГГц | 40–60 | Проста |
| 150 × 80 × 0.8 мм ³ (вісім елементів) | Заземлення | >11 | <0.15 | 3.4 ГГц–3.8 ГГц | | |
| | | | | 5.15 ГГц–5.9 ГГц | 45–65 | Проста |
| 150 × 75 × 0.8 мм ³ (вісім елементів) | Лінія нейтралізації | 10 | <0.32 | 3.3 ГГц–3.6 ГГц | 40–52 | Проста |
| 150 × 80 × 0.8 мм ³ (вісім елементів) | Ні | >17.5 | <0.05 | 3.3 ГГц–3.6 ГГц | 62–76 | Проста |
| 150 × 75 × 8 мм ³ (вісім елементів) | Ортогональна поляризація | >17 | <0.1 | 3.4 ГГц–3.6 ГГц | 49–72 | Помірна |
| 145 × 75 × 6 мм ³ (вісім елементів) | Ні | >15 | <0.16 | 3.4 ГГц–3.6 ГГц | 42–73 | Комплексна |
| 150 × 75 × 6.8 мм ³ (eight elements) | Ні | >14.7 | <0.05 | 3.3 ГГц–5.0 ГГц | 46–80 | Комплексна |
| 36 × 36 × 1.9 мм ³ (чотири елементи) | Різноманітність узорів | >10.8 | <0.08 | 3.4 ГГц–3.6 ГГц | 62–80 | Комплексна |
| 160 × 68 × 0.8 мм ³ (вісім елементів) | Різноманітність узорів | 15 | <0.15 | 3.3 ГГц–5.0 ГГц | 68–82 | Середня |

3.2 Конструкція MIMO антени

Антени з кількома входами та багатьма виходами (MIMO) зі здатністю випромінювати хвилі в більш ніж одній діаграмі спрямованості та поляризації відіграють велику роль у сучасних телекомунікаційних системах. В кваліфікаційній роботі розглядається теоретичний огляд різних методів зменшення взаємного зв'язку в антенних системах MIMO. Збільшення взаємозв'язку може різко вплинути на характеристики антени, таким чином погіршуючи продуктивність систем MIMO. Можна частково покращити продуктивність шляхом калібрування взаємозв'язку в цифровій області. Антена міліметрового діапазону (millimeter-wave – mmW) представлена для бездротових додатків п'ятого покоління (5G) із декількома входами та декількома виходами (MIMO), щоб запропонувати численні переваги, включаючи компактність, плоску геометрію, високу пропускну здатність і високу ефективність підсилення. Концепція пошкоджених наземних структур була вперше застосована в конструкції антени MIMO у спектрі mmW, щоб задовольнити вимоги 5G щодо високої пропускну здатності з компактністю та низькою складністю конструкції. Верхня поверхня антени містить копланарний хвилевідний T-подібний випромінювальний патч-елемент, тоді як нижня частина сконструйована так, щоб утворювати часткову землю, завантажену двома ітераціями симетричних розривних кільцевих прорізів на оптимізованій відстані. Загальний вигляд антенного пристрою 5G MIMO, призначеного для використання в системі смарт-мобільного телефону 5G, показано на рисунку 3.1.

Масштаб поля становить $150 \times 80 \text{ мм}^2$, а товщина трубки – 7 мм. Для створення корпусу смартфона використовується підкладка FR4 товщиною 0,8 мм, відносно діелектричною проникністю 4,4 і дотичними втратами 0,02.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 39 |

Для виготовлення каркаса та друкованої плати, відносна діелектрична проникність яких становить 4,4 і тангенс втрат 0,02, використовується підкладка FR4 товщиною 0,8 мм, а для радіаційного елемента – мідь (провідність $5,8 \times 10^7$ С/м). Провідність міді дуже міцна, і це не впливає на узгодження імпедансу. Розмір підкладки антени становить $150 \times 80 \times 7$ мм³, що сумісно з мобільним телефоном.

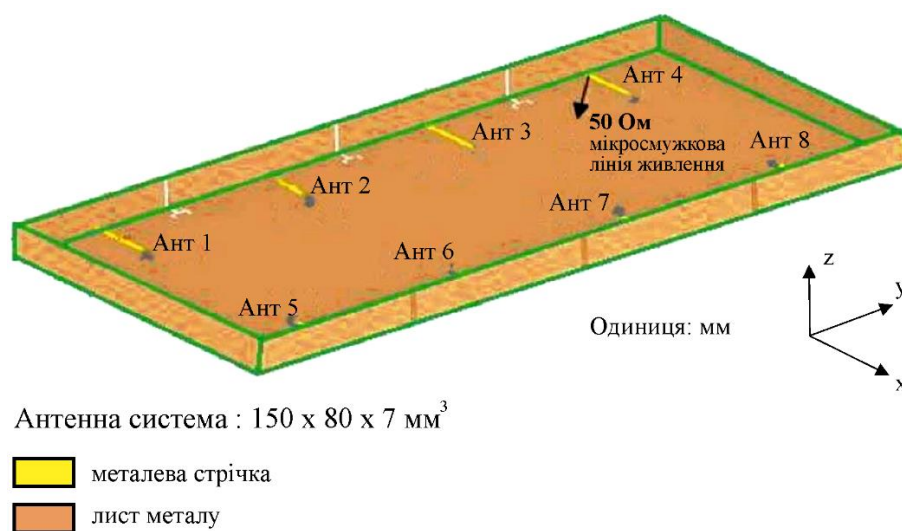


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд антени 5G MIMO

Структура слота антени 1 (Ант. 1) і антени 2 (Ант. 2) показана на рисунках 3.2 і 3.3. Частина 8-слотової антени розташована наступним чином. Антени 1, 3, 5 і 7, а також 2, 4, 6 і 8 розташовані вертикально вздовж двох сторін друкованої плати (праворуч і ліворуч). Кожна частина антени може повністю покривати діапазон від 3,3 ГГц до 5 ГГц у цій конструкції. Як видно, спочатку на поверхні вигравіровано E-подібний проріз $14 \text{ мм} \times 27 \text{ мм}$, який служить основним випромінювачем багатодіапазонної антени. Перевернута форма «I» формується шляхом розрізання секції отвору розміром $16 \text{ мм} \times 5,5 \text{ мм}$ над E-подібним отвором. E-подібний слот, який подається через перевернуту L-подібну смугу

подачі, має лише 11,8 мм, що свідчить про те, що запропонована функція антени має адекватний розмір для розумного мобільного телефону.

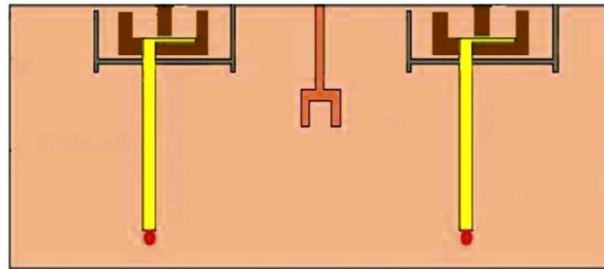


Рисунок 3.2 – Антена 5G MIMO з лінією живлення та елементом розв'язки

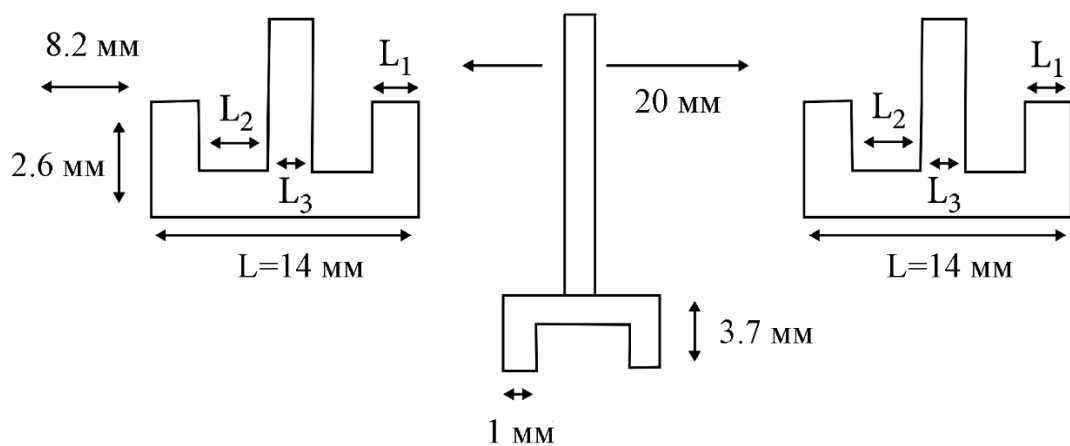


Рисунок 3.3 – Розміри антени 5G MIMO з лінією живлення та елементом розв'язки

Смуга живлення складається з 2 частин, а саме: вертикального сегмента 11,8 мм × 1,5 мм (мікросмужкова лінія подачі 50 Ом) і невеликої горизонтальної секції регулювання або наконечника регулювання, що тягнеться від точки, з розміром довжини L (мм) × ширина W (мм). Запропонований слот антени добре живиться та збалансований шляхом регулювання довжини L, ширини W та

відносного положення регулювальної секції. Інструмент моделювання здатний виконати ці параметри слота (L_1 , L_2 і L_3) і відстань поділу між ними. Для досягнення максимальної ефективності запропонованої антенної решітки МІМО було реалізовано два різних механізми. Параметр слота антени L_1 (мм), L_2 (мм) і L_3 (мм) змінювався від кожного антенного елемента, як показано в таблиці 3.2. Елемент антени є свого роду відкритим отвором, і чотири режими резонансу живляться за допомогою Е-подібних отворів, які значною мірою залежать від місцевості поблизу. Щоб досягти кращої узгодженості характеристик, елементи антени розташовані по-різному з різними розмірами, які переформовані та ефективно визначені.

Таблиця 3.2 – Варіанти L_1 , L_2 та L_3 елемента Е-слота

| L_1 (мм) | L_2 (мм) | L_3 (мм) |
|------------|------------|------------|
| 2 | 1 | 4.5 |
| 2.5 | 2 | 3.5 |
| 3 | 2.4 | 2.8 |
| 3.5 | 2 | 2.5 |
| 4 | 2 | 2.0 |

Простіший і швидший метод, ніж описаний раніше, виводить коефіцієнт кореляції з S-параметрів антен, тобто коефіцієнтів відбиття порту S_{11} і S_{22} двох антен, а також зв'язку $S_{21} = S_{12}$.

Загальна потужність випромінювання для двох антен дорівнює

$$\begin{aligned} P_{rad, 1} &= (1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)\eta_1, \\ P_{rad, 2} &= (1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)\eta_2, \end{aligned} \quad (1)$$

з якого зрозуміло визначення ефективності випромінювання η_1 і η_2 . З цього випливає, що внутрішні втрати для двох антен

$$\begin{aligned}
 P_{loss, 1} &= (1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - \eta_1), \\
 P_{loss, 2} &= (1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)(1 - \eta_2),
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

$$0 = \frac{S_{11}S_{12}^* + S_{21}S_{22}^*}{\sqrt{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2) + \rho_{rec} \sqrt{\eta_1 \eta_2} + \rho_{loss} \sqrt{(1 - \eta_1)(1 - \eta_2)}}.$$

Оскільки вираз у правій частині наведеного вище рівняння дорівнює нулю, один невідомий член можна обчислити, якщо відомі інші елементи. Принцип методу обчислення кореляції отриманого сигналу з параметрів S полягає в тому, щоб виміряти перший елемент і прийняти другий елемент як негативне значення цього значення.

S21: виміряний S параметр становить 26 дБ при 3,5 ГГц, 22 дБ при 4,5 ГГц і 20 дБ при 5,5 ГГц.

S32: виміряний S параметр становить 23 дБ при 3,5 ГГц, 32 дБ при 4,5 ГГц і 47 дБ при 5,5 ГГц.

S31: виміряний S параметр становить 25 дБ при 3,5 ГГц, 21 дБ при 4,5 ГГц і 20 дБ при 5,5 ГГц.

S51: виміряний S параметр становить 26 дБ при 3,5 ГГц, 30 дБ при 4,5 ГГц і 32 дБ при 5,5 ГГц.

Щоб дослідити резонансні механізми, необхідно створити прорізи, регулюючи електричну довжину E та I . Однак антена з прорізами E та I резонує на 4 різних частотах.

На рисунках 3.4 і 3.5 показано, що 1-й резонанс поширюється переважно навколо E -подібних слотів. Резонансні поверхневі струми 2-й і 3-й в основному зосереджені в слоті. Проте 4-й резонанс виникає внаслідок сполучення між E - та I -подібними слотами. Змінюючи електричну довжину незмінених I -подібних слотів, досліджували резонансні механізми. Виявлено, що резонанс змінюється на високу частоту в 1-му, 2-му, 3-му і 4-му, тоді як 3-й резонанс залишається незмінним. Навпаки, довжина I -подібних слотів збільшується, а довжина E -подібних слотів залишається незмінною. Резонанси 2-й, 3-й і 4-й явно зміщуються до нижчої частоти, тоді як 1-й резонанс залишається незмінним.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 43 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Можна зробити висновок, що перший резонанс утворюється від Е-подібного слоту, другий і третій резонанс можуть утворюватись від І-подібних слот, четвертий резонанс утворюється від Е- та І-подібних слот. Нарешті, діапазон частот від 3,3 ГГц до 6 ГГц може підтримувати запропоновану функцію антени з коефіцієнтом відбиття, меншим, ніж коефіцієнт стоячої хвилі напруги -6 дБ (3 : 1).

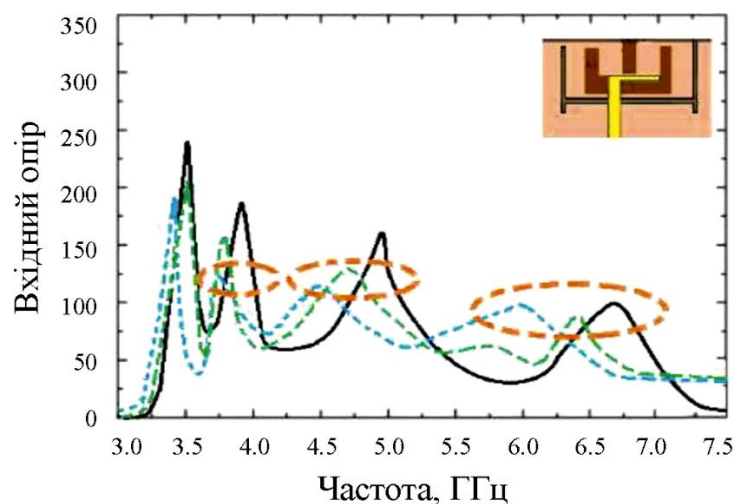


Рисунок 3.4 – Вхідний опір антенного елемента

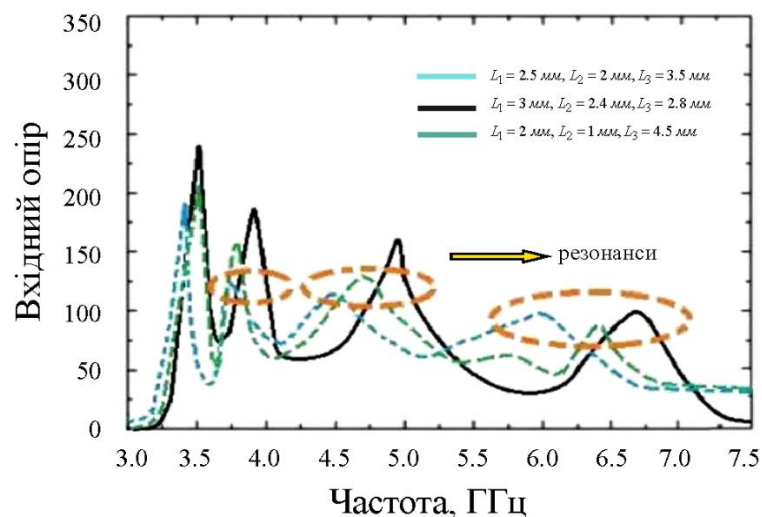


Рисунок 3.5 – Вхідний опір антенного елемента з варіацією Е-подібного слота

3.3 Висновки до третього розділу

Розглянуто один із ключових показників, а саме швидкість передачі даних потенційного підключення до 5G. Антена 5G є ефективнішою для підвищення ефективності спектру та швидкості передачі даних, встановлення кількох елементів у дуже обмеженому просторі мобільного телефону є непростим завданням. Запропонована компактна антена на мікросхемі виготовлена на основі п'яти шарів, що містять металевий кремній.

Ефективність масиву було покращено шляхом вбудовування патч-антен в решітку з субхвильовими прорізами. Показано, що відомі проблеми, що стосуються вбудованих антен, можна зменшити шляхом застосування двовимірної композитної право/лівосторонньої метаматеріальної лінії передачі. Ефективність запропонованого методу, якщо порівнювати зі звичайними конструкціями вбудованої антени, показує покращення смуги пропускання імпедансу, підсилення випромінювання та ефективності.

Техніка розв'язки та процес зменшення антени стали основною вимогою для конструкції антени, щоб задовольнити вимоги добре упакованого макета антени та збільшити утеплення або ізоляцію. Зменшення взаємозв'язку є основною проблемою при розробці масиву MIMO. Щоб вирішити проблему поділу, було реалізовано кілька методів роз'єднання.

Показано, що метод роз'єднання ефективно зменшує взаємозв'язок між сусідніми елементами випромінювання, які інакше можуть підірвати підсилення випромінювання та діаграму спрямованості масивів. Периферія кожної накладки вбудована в круглі діелектричні слоти, які створені на основі концепції метаповерхні для підвищення радіаційного підсилення та ефективності.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 45 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

4 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ АНТЕНИ МІМО ІЗ ЗБАГАЧЕННЯМ ІЗОЛЯЦІЇ

4.1 Алгоритм розв'язки системи МІМО

Основна ідея алгоритму розв'язки, запропонованого Боксенбомом і Худом, полягає в тому, щоб зробити загальну передатну функцію замкнутого циклу керованої системи МІМО по діагоналі. Поки що це все ще основне вирішення проблеми зв'язку. Деякі інші видатні внески були зроблені на основі цієї ідеї. Для систем з одним входом і одним виходом (single-input-single-output – SISO) існує загальноприйнятий алгоритм компенсації затримки під назвою «Smith параметр». Цей алгоритм компенсації був удосконалений, щоб бути застосовним до систем МІМО з багатоваріантними затримками Огуннайке і Рей за деякими специфікованими припущеннями. Можна знайти й інші розробки, спрямовані на мультिवаріантний «Smith параметр». Ці методи розв'язки в основному зосереджені на системах з багатопараметричними затримками. Ці методи роз'єднання намагалися спочатку роз'єднати систему МІМО, тому проблема керування інтерактивною системою МІМО трансформувалася б у проблеми керування кількома одноконтурними системами. Потім можна сконструювати «Smith параметр» на основі роз'єднаної системи. Однак через невизначену точність параметра, нездійснений вираз матричної інверсії та складну процедуру розв'язування не можна було широко застосовувати розв'язування Сміт-параметра в промислових процесах.

Тут було започатковано різноманітні методи роз'єднання, щоб покращити розділення між кожним із двох компонентів антени. У даній конструкції зв'язок індукується струмом через поверхню на металевій рамі між двома компонентами антени. Отже, два елементи антени були розділені витравленим слотом, витравленим на металевій рамі, і використали унікальний резонатор, схожий на

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 46 |

гайковий ключ, для обмеження поверхневого струму; незважаючи на те, що таке розташування збільшує вільну поверхню антени, воно може ефективно підсилити ізоляцію елемента.

Для системи антенної решітки МІМО цей підхід рекомендується з більшою вимогою до ізоляції, але з низьким обмеженням очищення. Дана конструкція без розв'язки також може задовольнити вимоги до антени з дуже обмеженим параметром, але з меншими вимогами до розділення.

Щоб перевірити механізм розв'язки елемента, розподіл поверхневого струму за відсутності та наявності розв'язувальної структури показано на рисунку 4.1 а,б. Порівняння розподілу поверхневого струму між рисунками 4.1,а і 4.1,б показує, що коли перша антена подається під напругу та збуджена, друга антена має навантаження 50 Ом, і коефіцієнт розв'язки, запропонований тут, успішно виключає поверхневий струм, що протікає від антени 1 до антени 2. Потім, у ситуації з компонентами розв'язки та без них, коефіцієнти передачі між двома парами антени 1, антени 2 та антени 3 були показані на рисунках 4.2 та 4.3. Очевидно, що зі структурою розв'язки ступінь ізоляції елементів підвищується до понад 20 дБ, що є конкурентоспроможним у цьому відношенні.

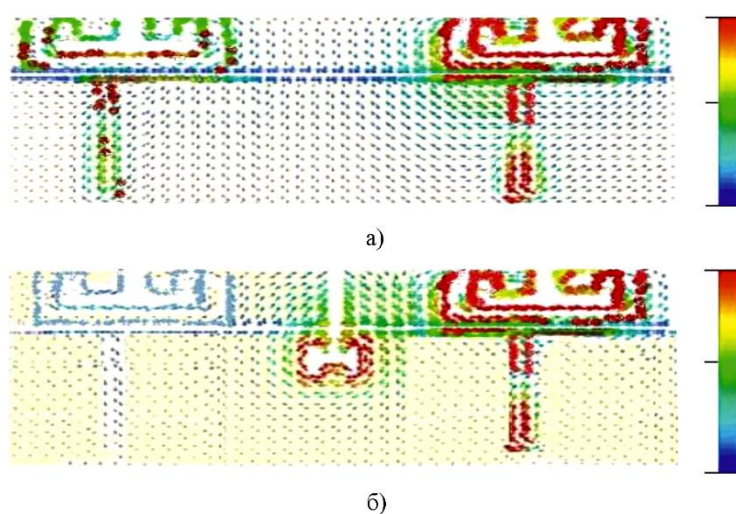


Рисунок 4.1 – Відсутність структури розв'язки між антенами 1 і 2 (а).

Наявність структури розв'язки між антенами 1 і 2 (б)

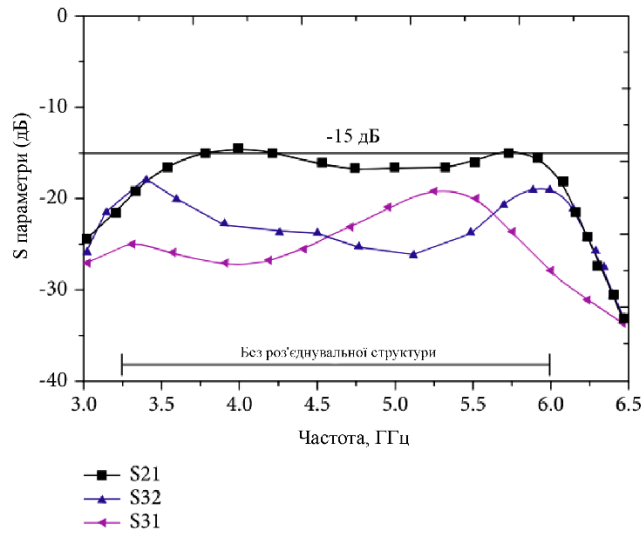


Рисунок 4.2 – Коефіцієнт пропускання без розв'язувальної структури

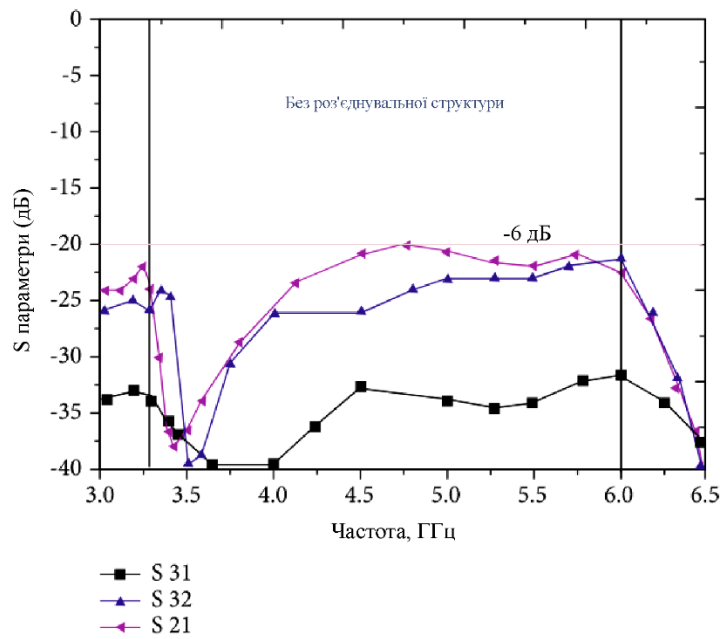


Рисунок 4.3 – Коефіцієнт пропускання зі структурою розв'язки

4.2 S-параметри

Коефіцієнт пропускання, коефіцієнт відбиття та S- параметри конструкції антени розглянуті в даному розділі. Запропонована конструкція антени МІМО

може підтримувати широкосмуговий діапазон від 3,3 ГГц до 6,0 ГГц із коефіцієнтом відбиття менше -6 дБ (3 : 1 КСХ).

4.3 Коефіцієнт передачі

Коефіцієнт передачі між будь-якими антенними парами 1, 2 і 3 у випадку елемента розв'язки з елементом розв'язки або без нього показано на рисунках 4.2 і 4.4. Звідси випливає, що без структури розв'язки ізоляція елемента становить близько -15 дБ; очевидно, що ізоляція елементів підсилюється більш ніж на -20 дБ за допомогою структури розв'язки. Коефіцієнт відбиття між портами S_{21} , S_{32} , S_{51} і S_{62} було проаналізовано, оскільки порти 1 і 2, 2 і 3, 1 і 5, а також 2 і 6 примикають один до одного, а також зв'язок між ними є більш потужним, ніж інша пара. Змодельовані значення добре збігаються, і ізоляція елемента перевищує -20 дБ у цільовій смузі частот.

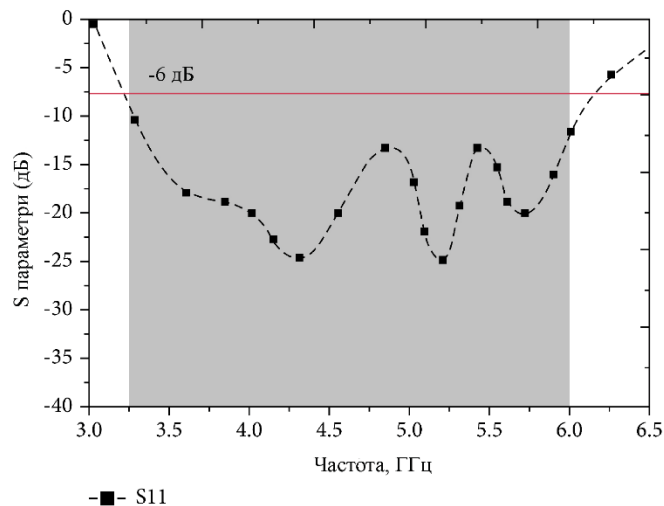


Рисунок 4.4 – Змодельовані коефіцієнти відбиття

Змодельовані результати ефективності антени наведено нижче. На рисунку 4.5 чітко показано, що ефективність антени перевищує 80% на всіх цільових частотних діапазонах.

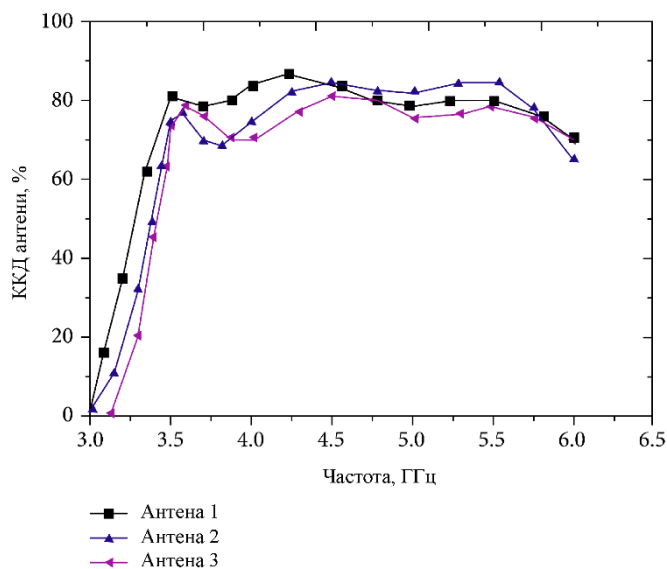


Рисунок 4.5 – Результат моделювання ефективності антени

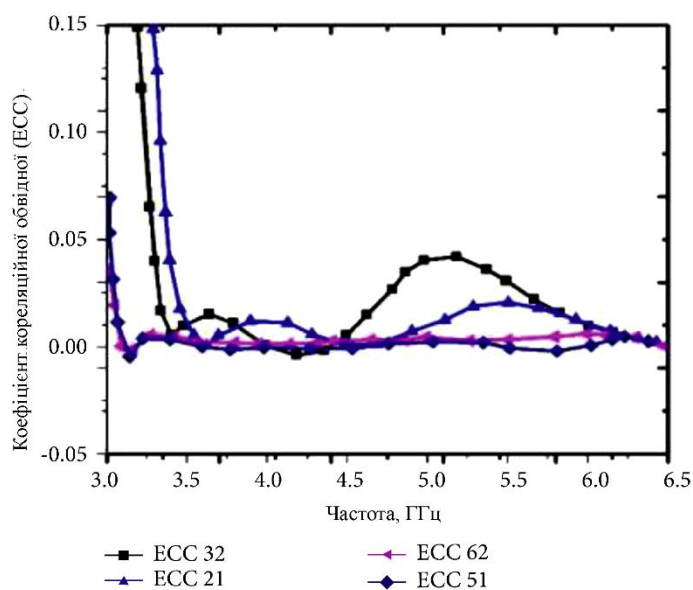


Рисунок 4.6 – Результат моделювання коефіцієнта кореляції обвідної (ЕСС)

Проаналізовано коефіцієнт кореляції обвідної (envelope correlation coefficient – ECC) запропонованої в даному розділі системи. ECC є важливим аспектом доступу до мультиплексування та рознесеності антенної системи МІМО. На рисунку 4.6 зображено віртуальний ECC антенних пар 1 і 2, 2 і 3, 1 і

5, 2 і 6. Пари антен є кращими, оскільки вони розташовані близько одна до одної. Для простоти коефіцієнт кореляції огинаючої пари антен, яка є симетричною, сюди не включено. На наведеному вище рисунку ЕСС у цільовому діапазоні частот нижчий за 0,04, що забезпечує багатообіцяючий результат.

4.4 Показники ефективності діаграми випромінювання

У цьому розділі проаналізовано діаграму спрямованості антени 1 і діаграму спрямованості антени 2. Замість симетричної схеми МІМО моделі випромінювання інших компонентів антени антенної системи не включені для простоти. Змодельовані тривимірні діаграми спрямованості антени 1, що працюють на трьох різних частотах, таких як 3,5 ГГц, 4,5 ГГц і 5,5 ГГц, представлені на рисунку 4.7, а тривимірні діаграми спрямованості антени 2, що працюють на трьох різних частотах, таких як 3,5 ГГц, 4,5 ГГц, і 5,5 ГГц представлені на рисунку 4.8, відповідно.

На рисунках 4.7 і 4.8 показано, що максимальна траєкторія випромінювання антени 1 нахилена, і вказує на те, що третій квадрант або циферблат годинника знаходиться на частоті 3,5 ГГц; антена 1 діаграми спрямованості антени також спотворені на частотах 4,5 ГГц та 5,5 ГГц. Обґрунтування полягає в тому, що для антени 1 поле є асиметричним. А на рисунку 4.8 зміни випромінювання антени 2 виглядають більш симетричними в діапазоні частот, ніж коливання випромінювання антени 1. Насправді заземлення антени 2 є відносно симетричним по відношенню до заземлення антени 1. Отже, загальне випромінювання шляхи антени 1 і антени 2 не вказують через смугу частот одна на одну, що призводить до хорошого ЕСС менше 0,04.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 51 |

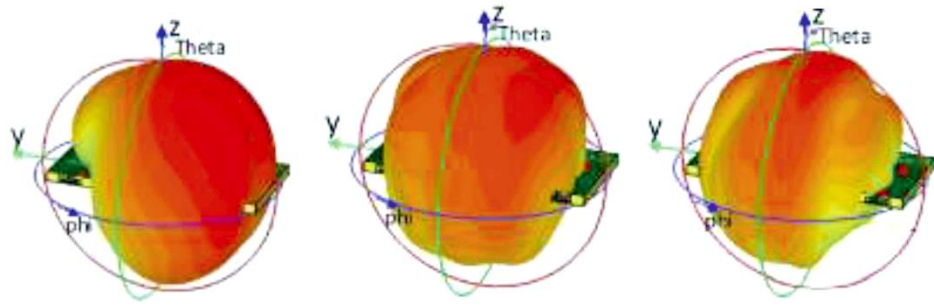


Рисунок 4.7 – Тривимірна діаграма спрямованості для антени 1, змодельована на частотах 3,5 ГГц, 4,5 ГГц і 5,5 ГГц

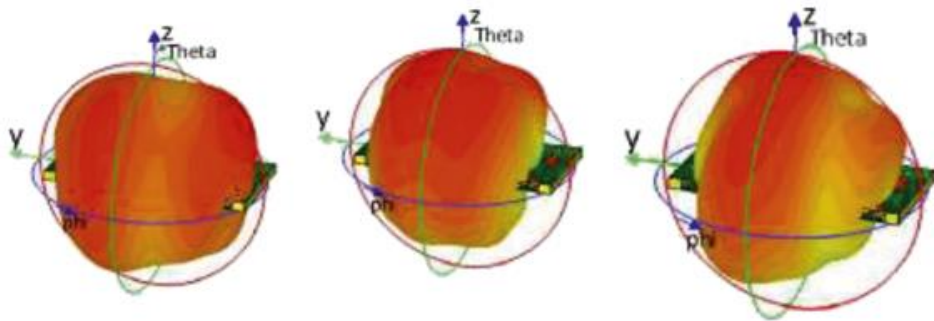
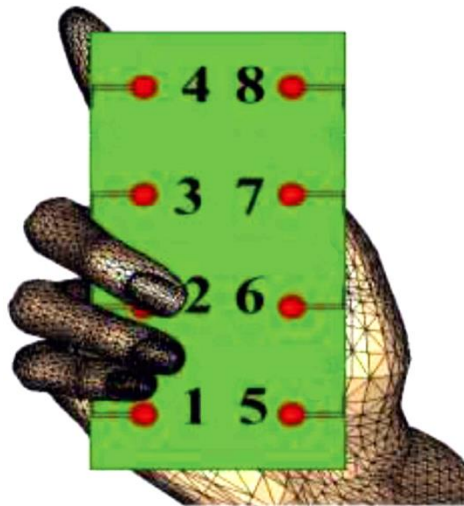


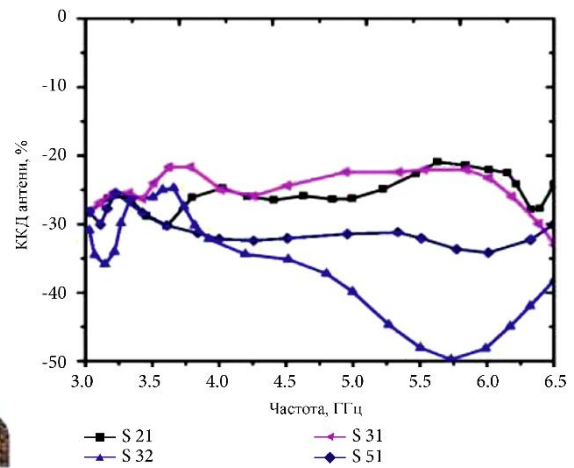
Рисунок 4.8 – Тривимірна діаграма спрямованості для антени 2, змодельована на частотах 3,5 ГГц, 4,5 ГГц і 5,5 ГГц

4.5 Вплив на манеру поведінки рук і голови оператора

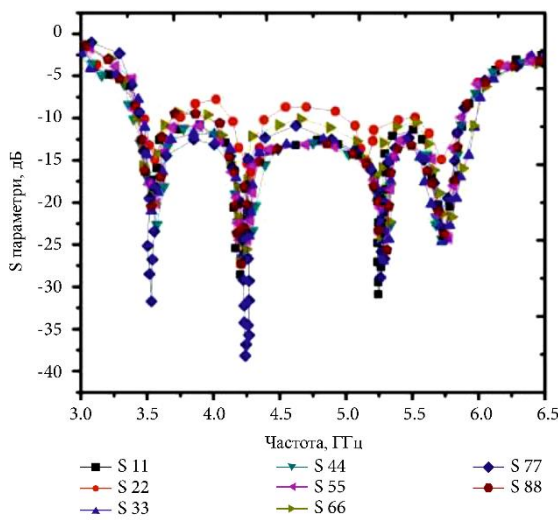
Нарешті, у даному розділі показано вплив моделі однієї руки, моделі двох рук і моделі голови-руки оператора. У кількох випадках досліджувалось відповідно коефіцієнт розповсюдження, дисперсія коефіцієнтів відбиття та ефективність випромінювання. На рисунку 4.9 разом із підрозділами (а, б, в і г) модель однією рукою моделює антену систему МІМО. Незважаючи на те, що адекватність імпедансу нижчому діапазону частот дещо погіршилася, усі антени все ще здатні покривати 3,3–6,0 ГГц.



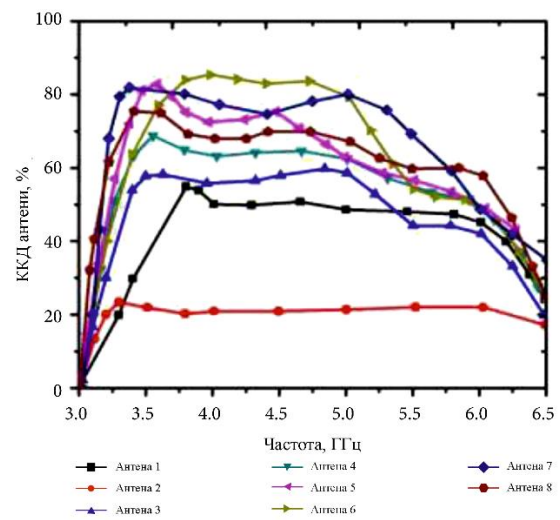
а)



б)



в)



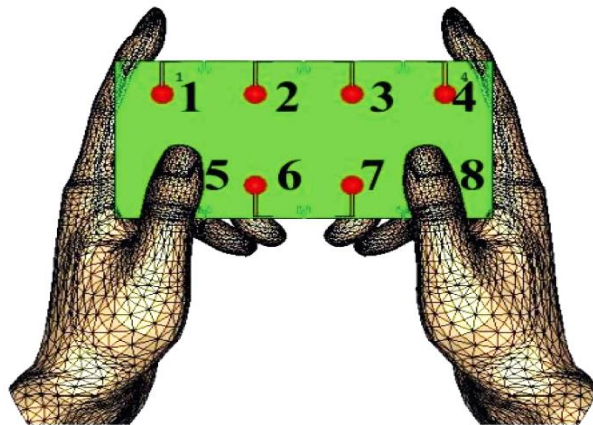
г)

Рисунок 4.9 – а) модель однією рукою; б) коефіцієнт пропускання моделі однією рукою; в) коефіцієнт відбиття моделі однією рукою; г) ефективність антени моделі однієї руки

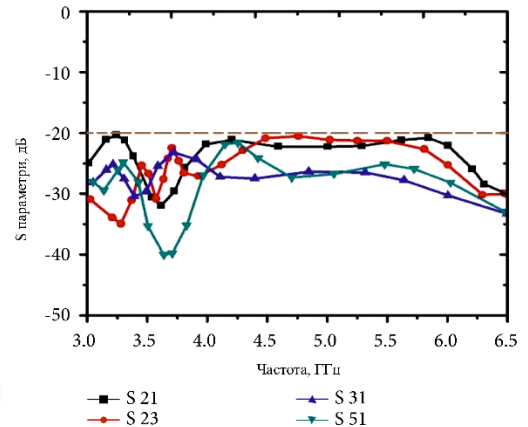
Ізоляція компонентів залишається понад 20 дБ. Їх ефективність випромінювання різко знизилася через прямий дотик пальців антен 1-2, хоча ефективність антен 3-8 залишається вищою за 60% у цільовому діапазоні частот.

На рисунку 4.10 разом із його підрозділами (а, б, в і г) з моделлю з двома руками змодельована антенна система МІМО. На великі пальці впливають

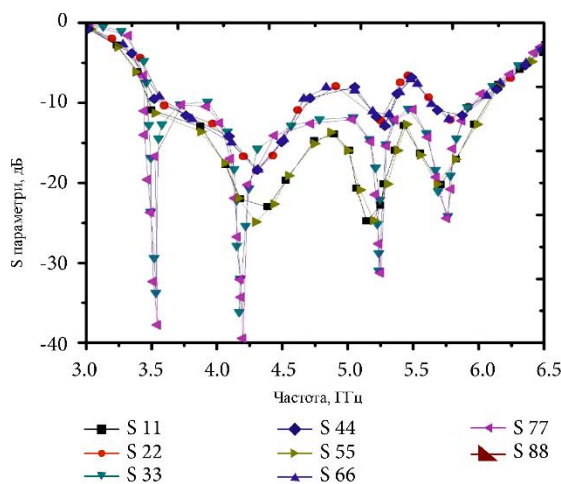
антени 5 і 8, що призводить до балансування виродженого імпедансу та якості випромінювання. Тим не менш, ізоляція елемента становить понад 20 дБ, а продуктивність вище 60 відсотків; антени 1, 2, 3, 4, 6, 7 і 8 все ще працюють на 3,3–6,0 ГГц.



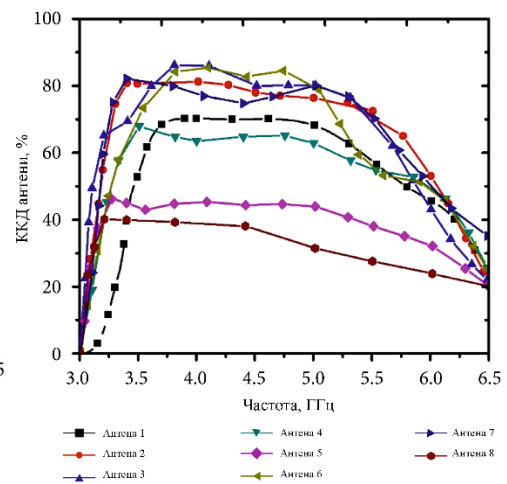
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.10 – а) модель подвійної руки; б – коефіцієнт пропускання моделі з двома стрілками; в) коефіцієнт відбиття моделі з подвійною стрілкою; г) ефективність антени моделі з подвійною рукою

| | | | | |
|------|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

На рисунку 4.11 разом із підрозділами (а, б, в і г) модель голова-рука імітує систему антени МІМО. Коефіцієнти відбиття залишаються постійними, а ізоляція елемента залишається 20 децибел.

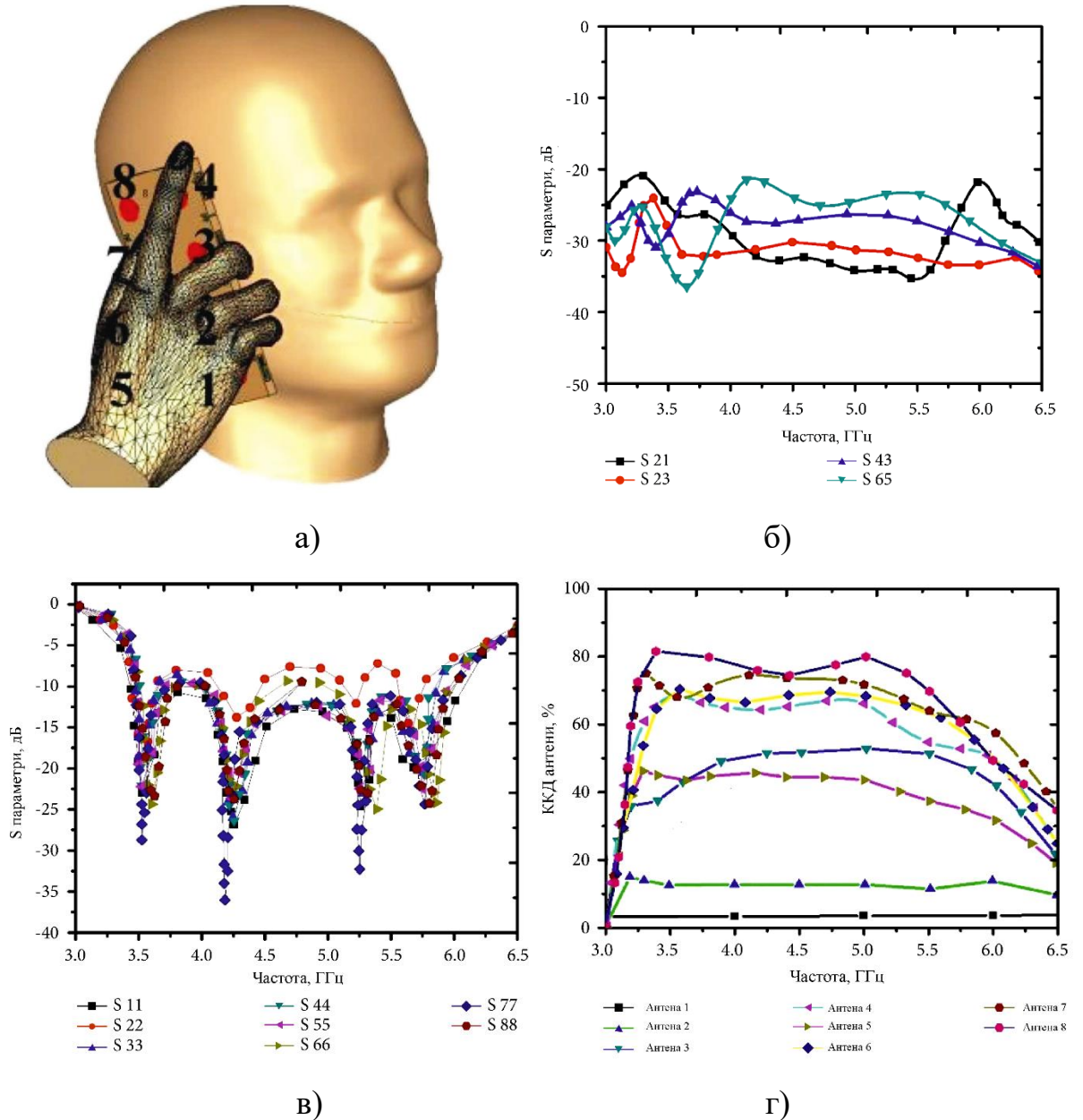


Рисунок 4.11 – а) модель голова-рука; б) коефіцієнт передачі моделі голова-рука; в) коефіцієнт відбиття моделі голова-рука; г) ефективність антени моделі голова-рука

| | | | | |
|------|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Для порівняння, ефективність випромінювання деяких антен була знижена, оскільки частина випромінюваної енергії споживалася варіантами для рук і голови. Як наслідок, ККД антен 2, 3 і 5 становить менше 60%, ККД антени 8 становить близько 60%, а ККД антен 1, 4, 5, 6 і 7 навіть більше 60%. Запропонована широкопasmтова антена МІМО демонструє досить хорошу ізоляцію та низький коефіцієнт кореляції огиначаючої, обидва з яких є досить хорошими для застосування антени МІМО п'ятого покоління (5G). Результати розрахунків показують, що робочий діапазон частот запланованої антенної решітки здатний охоплювати від 3,3 до 6 ГГц з ізоляцією понад 20 дБ. Антена гарантує, що рівень ЕСС буде меншим за 0,04. Запропонована технологія антени МІМО також ефективна для додатків мобільних терміналів 5G. У майбутньому дослідження будуть вдосконалюватися шляхом включення різних параметрів багатовихідного сигналу з ефективністю антени.

4.6 Висновки до четвертого розділу

У даному розділі розглянути методи роз'єднання для покращення розділення між кожним із двох компонентів антени. У запропонованій конструкції зв'язок індукується струмом через поверхню на металевій рамі між двома компонентами антени. Розглянуто восьмикомпонентну антенну систему МІМО для мобільних додатків 5G. Антенна решітка МІМО 5G може працювати належним чином, використовуючи частину металевого каркасу.

За допомогою моделювання було підтверджено, що дану модель антени можна досягти з ефективною ізоляцією антени, використовуючи техніку розв'язки.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 56 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ВИСНОВКИ

Потреба в ефективному стільниковому спектрі, який міг би вмістити величезний сплеск бездротового трафіку даних, є неминучою. Масова технологія бездротового доступу MIMO є відповіддю на цей глобальний попит.

У даній кваліфікаційній роботі представлено огляд масивних систем MIMO, висвітлено ключові базові технології для мереж 5G і не тільки. Незважаючи на те, що масивна технологія MIMO пропонує величезні переваги для мереж 5G і 6G, все ще існують різні проблеми розгортання, такі як забруднення пілотного каналу, оцінка каналу, попереднє кодування, планування користувача, порушення апаратного забезпечення, енергоефективність і виявлення сигналу, які необхідно вирішити, перш ніж ми зможемо досягти її обіцяні переваги.

Розглянуто восьмикомпонентну антенну систему MIMO для мобільних додатків 5G. Антенна решітка MIMO п'ятого покоління може працювати належним чином, використовуючи частину металевого каркасу.

За допомогою моделювання було підтверджено, що запропоновану антену можна досягти з ефективною ізоляцією антени, використовуючи техніку розв'язки. Зокрема, запропонований широкосмуговий антенний пристрій MIMO демонструє досить хорошу ізоляцію та низький коефіцієнт кореляції огинаючої, обидва з яких є досить хорошими для застосування антени MIMO п'ятого покоління. Результати розрахунків показують, що робочий діапазон частот запланованої антенної решітки здатний охоплювати від 3,3 до 6 ГГц з ізоляцією понад 20 дБ. Антена гарантує, що рівень ЕСС буде меншим за 0,04. Запропонована технологія антени MIMO також ефективна для додатків мобільних терміналів 5G.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КвРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 57 |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Одарченко Р. С. Ключові напрямки досліджень стільникових мереж на шляху до 6G (огляд) // Р. С. Одарченко, Т. В. Дика, О. В. Жарова, М. С. Одарченко, В. М. Жога, О. П. Слободян – Наукоємні технології No 3(55), 2022, с. 215-228.
2. Кравченко В. І. Дослідження роботи бездротової системи 5G при різних умовах навколишнього середовища // Наук. зап. Укр. н.-д. ін-ту зв'язку. – 2019. – № 4.
3. D. Mi, R. Odarchenko et al., "Demonstrating Immersive Media Delivery on 5G Broadcast and Multicast Testing Networks," in IEEE Transactions on Broadcasting, doi: 10.1109/TBC.2020.2977546.
4. M. Liyanage, A. Gurtov, and M. Ylianttila, Soft-ware Defined Mobile Networks (SDMN): Beyond LTE Network Architecture. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2015. doi.org/10.1002/9781118900253
5. S. Wijethilaka and M. Liyanage, "Realizing Internet of Things with network slicing: Opportunities and challenges," in Proc. IEEE 18th Annu. Consum. Commun. Netw. Conf. (CCNC), 2021, pp. 1–6 doi.org/10.1109/CCNC49032.2021.9369637.
6. Y. Siriwardhana, C. De Alwis, G. Gür, M. Ylianttila, and M. Liyanage, "The fight against the COVID-19 pandemic with 5G technologies," IEEE Eng. Manag. Rev., vol. 48, no. 3, pp. 72–84, Sep. 2020. doi.org/10.1109/EMR.2020.3017451.
7. W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems," IEEE Netw., vol. 34, no. 3, pp. 134–142, May/Jun. 2019. doi.org/10.1109/MNET.001.1900287.
8. Максимюк Т. А. Моделі конвергенції гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління на основі технології D2D // Телекомунікац. та інформ. технології. - 2015. - № 3.
9. Одарченко Р. С. Обґрунтування основних вимог до систем безпеки стільникових мереж 5-го покоління // Безпека інформації. - 2015. - № 3.
10. Степанов С. В. Важливість упровадження 5G // Зв'язок. - 2019. - № 2.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КВРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 58 |

11. Русек, Ф. Розширення МІМО: можливості та виклики з дуже великими масивами // Русек, Ф.; Перссон, Д.; Лау, Б.К.; Ларссон, Е.Г.; Марцетта, Т.Л.; Едфорс, О.; Туфвессон, Ф. Процес сигналу IEEE. Маг. 2013, 30, 40–60.

12. Ларссон, Е.Г. Масивний МІМО для бездротових систем нового покоління // Ларссон, Е.Г.; Туфвессон, Ф.; Едфорс, О.; Т.Л. Марцетта / IEEE Commun. Маг. 2014, 186–195.

13. Ван, Х. Зв'язок на міліметрових хвилях: комплексне дослідження // Конг, Л.; Конг, Ф.; Цю, Ф.; Ся, М.; Арнон, С.; Чен, Г. I IEEE Commun. Surv. Tutor. 2018, 20, 1616–1653.

14. Чакаборті, Р.; Кумарі, Н.; Мусам, М.; Мукерджі, А. Майбутнє 5G і міліметрових хвиль. У матеріалах Другої міжнародної конференції з електроніки, зв'язку та аерокосмічних технологій 2018 р. (ICESA), Коїмбатор, Індія, 29–31 березня 2018 р.; С. 1679–1683.

15. Сінгх, Р. За межами 5G: роль терагерцової спектру // Лер, В.; Сікер, Д.; Гук, С.М. – Доступно в Інтернеті: <https://ssrn.com/abstract=3426810/>

16. Жорнет, Дж.М.; Акйилдиз, І.Ф. Плазмонічна наноантена на основі графену для зв'язку в терагерцовому діапазоні в наномережах. IEEE J. Sel. Areas Commun. 2013, 31, 685–694.

17. Фейсал А. Надмасивні системи МІМО на терагерцевих діапазонах: перспективи та виклики // Фейсал, А.; Sarieddeen, Н.; Dahrouj, Н.; Аль-Наффурі, Т.Й.; Алуїні, М.С. / arXiv 2019, arXiv:1902.11090.

18. Сивик О. С. Аналіз напрямків розвитку майбутніх телекомунікаційних технологій // Зв'язок. - 2021. - № 3.

19. A. A. Althwayb, M. Alibakhshikenari, B. S. Virdee, H. Benetatos, F. Falcone, and E. Limiti, “Antenna on chip (AoC) design using metasurface and SIW technologies for THz wireless applications,” Electronics, vol. 10, no. 9, 1120 pages, 2021.

20. B. S. Virdee and S. Salekzamankhani, “High-isolation antenna array using SIW and realized with a graphene layer for sub-terahertz wireless applications,” Scientific Reports, vol. 11, Article ID 10218, 2021.

21. M. Alibakhshikenari, B. S. Virdee, M. Khalily et al., “High-gain on-chip antenna design on silicon layer with aperture excitation for terahertz applications,” IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 19, no. 9, pp. 1576–1580, 2020.

| | | | | | | |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
| | | | | | КВРТР. 2019006.01.06 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | 59 |

22. S. Zhang, A. A. Glazunov, Z. Ying, and S. He, "Reduction of the envelope correlation coefficient with improved total efficiency for mobile LTE MIMO antenna arrays: mutual scattering mode," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 61, no. 6, pp. 3280–3291, 2013.

23. L. Zhao and K.-L. Wu, "A dual-band coupled resonator decoupling network for two coupled antennas," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, no. 7, pp. 2843–2850, 2015.

24. A. Zhao and Z. Ren, "Size reduction of self-isolated MIMO antenna system for 5G mobile phone applications," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 18, no. 1, pp. 152–156, 2019.

25. C. F. Ding, X. Y. Zhang, C.-D. Xue, and C.-Y.-D. Sim, "Novel pattern-diversity-based decoupling method and its application to m antenna," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 10, pp. 4976–4985, 2018.

26. M. S. Khan, A. D. Capobianco, A. Naqvi, B. Ijaz, S. Asif, and B. D. Braaten, "Planar, compact ultra-wideband polarisation diversity antenna array," IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 9, no. 15, pp. 1761–1768, 2015.

27. K.-L. Wong, C.-Y. Tsai, and J.-Y. Lu, "Two asymmetrically mirrored gap-coupled loop antennas as a compact building block for eight-antenna MIMO array in the future smartphone," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 65, no. 4, pp. 1765–1778, 2017.

28. K.-L. Wong, J.-Y. Lu, L.-Y. Chen, W.-Y. Li, and Y.-L. Ban, "8-antenna and 16-antenna arrays using the quad-antenna linear array as a building block for the 3.5-GHz LTE MIMO operation in the smartphone," Microwave and Optical Technology Letters, vol. 58, no. 1, pp. 174–181, 2016.

29. W. Jiang, B. Liu, Y. Cui, and W. Hu, "High-isolation eight-element MIMO array for 5G smartphone applications," IEEE Access, vol. 7, pp. 34104–34112, 2019.

30. Y. Wang and Z. Du, "A wideband printed dual-antenna with three neutralization lines for mobile terminals," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, no. 3, pp. 1495–1500, 2014.

31. X. Rong Lin Li and R. Li, “A novel dual-band MIMO antenna array with low mutual coupling for portable wireless devices,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 10, pp. 1039–1042, 2011.

32. Y. Li, C. Y. D. Sim, Y. Luo, and G. Yang, “Multiband 10 antenna array for sub 6 GHz MIMO applications in 5G smartphones,” *IEEE Access*, vol. 6, 2018.

33. Li, L.; Hou, H.; Meng, W. Convolutional Neural Network Based Detection Algorithm for Uplink Multiuser Massive MIMO Systems. *IEEE Access* 2020, 8, 64250–64265.

34. Demir, Ö.T.; Björnson, E. Channel Estimation in Massive MIMO Under Hardware Non-Linearities: Bayesian Methods Versus Deep Learning. *IEEE Open J. Commun. Soc.* 2020, 1, 109–124.

35. Jeon, Y.; Lee, N.; Poor, H.V. Robust Data Detection for MIMO Systems With One-Bit ADCs: A Reinforcement Learning Approach. *IEEE Trans. Wirel. Commun.* 2020, 19, 1663–1676.

36. What is 4x4 MIMO, and Does My Smartphone Need It? Available online: <https://www.howtogeek.com/394266/what-is-4x4-mimo-and-does-my-smartphone-need-it> (accessed on 25 January 2020).

37. Simeone, O. A Very Brief Introduction to Machine Learning with Applications to Communication Systems. *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.* 2018, 4, 648–664.

38. Booth, J.; Katosh, S.; Alkhateeb, A.; Ewaisha, A.; Spanias, A. Machine Learning for Reliable MIMO Systems. *IRES Summer Res.* Available online: https://sensip.engineering.asu.edu/wp-content/uploads/2019/07/IRES_abstract.pdf (accessed on 11 May 2020).

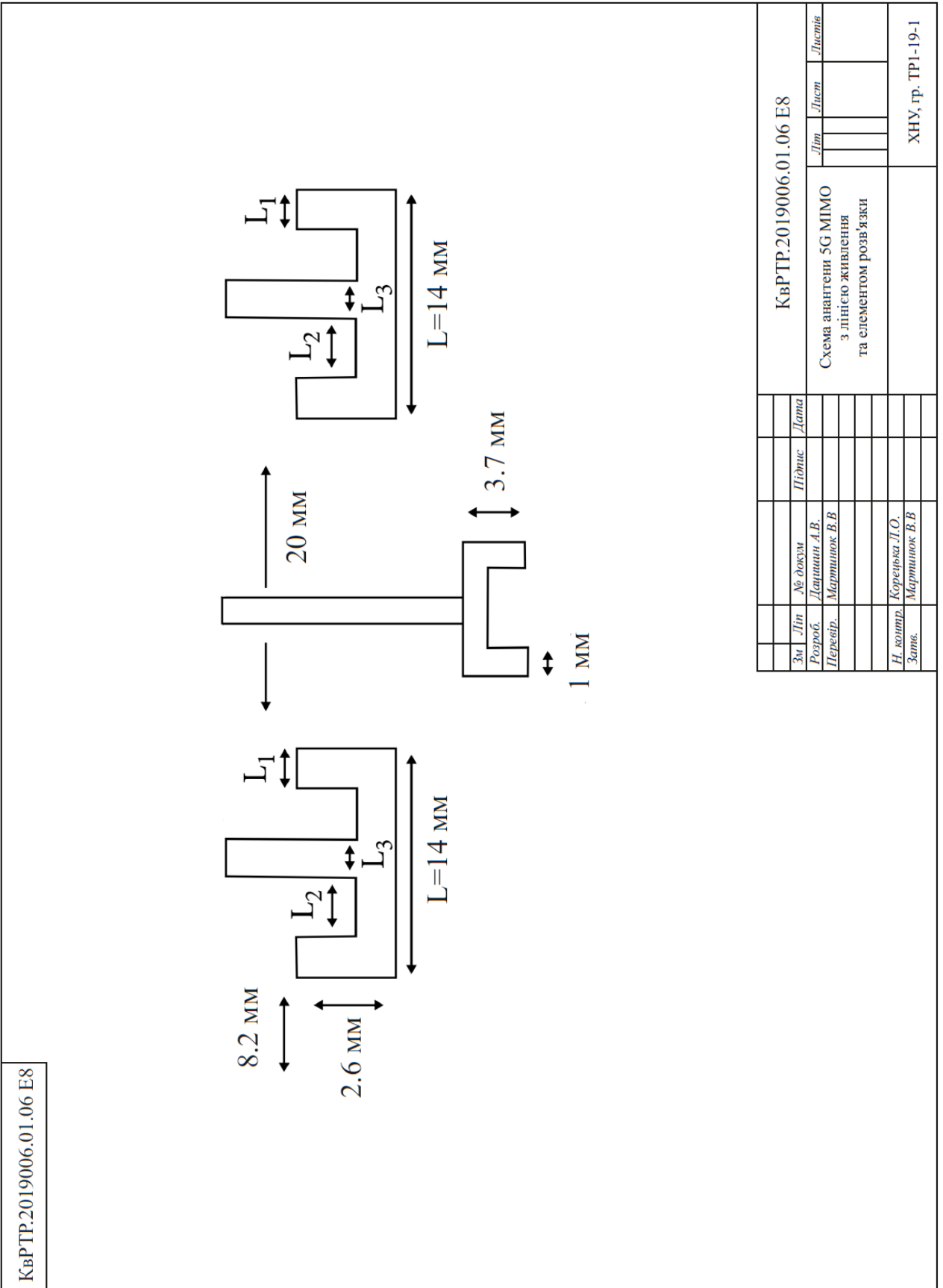
39. Mei, K.; Liu, J.; Zhang, X.; Wei, J. Machine Learning-Based Channel Estimation: A Computational Approach for Universal Channel Conditions. *arXiv* 2019, arXiv:1911.03886.

40. Yang, Y.; Gao, F.; Ma, X.; Zhang, S. Deep learning-based channel estimation for doubly selective fading channels. *IEEE Access* 2019, 7, 36579–36589.

ДОДАТКИ

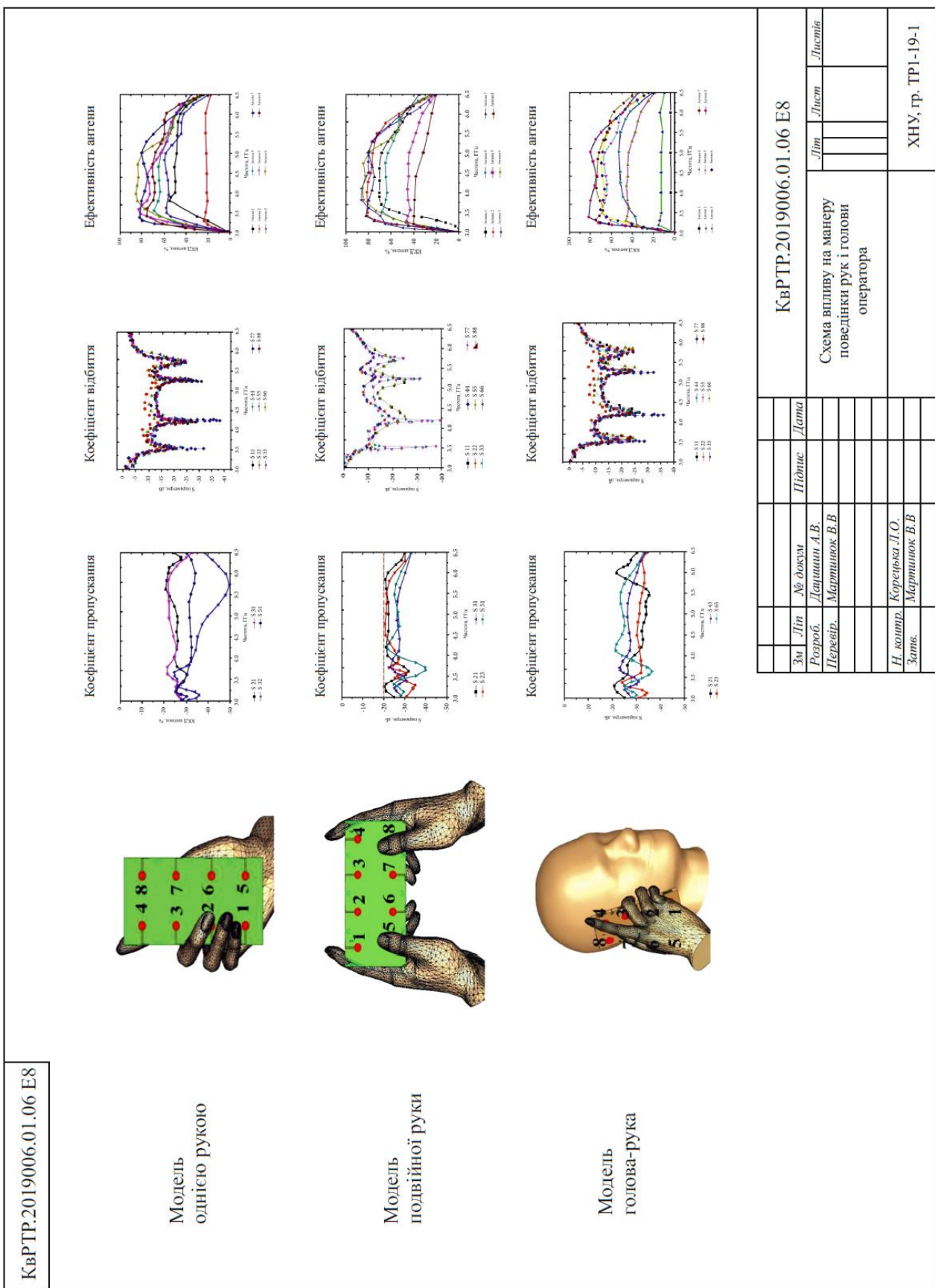
Додаток Б

Схема антени 5G MIMO з лінією живлення та елементом розв'язки



Додаток В

Схема впливу на манеру поведінки рук і голови оператора



Ім'я користувача:
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:
1015575495

Дата перевірки:
12.06.2023 23:59:47 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
13.06.2023 00:47:35 EEST

ID користувача:
100005862

Назва документа: Дацишин

Кількість сторінок: 58 Кількість слів: 9782 Кількість символів: 70158 Розмір файлу: 3.18 MB ID файлу: 1015225947

119 слів позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

Виявлено модифікації тексту (можуть впливати на відсоток схожості)

4.54% Схожість

Найбільша схожість: 2.78% з Інтернет-джерелом (<https://dut.edu.ua/repozitorii/mvt/2022/%d0%a4%d0%b5%d0%bd%d1..>)

4.45% Джерела з Інтернету 53 Сторінка 60

0.93% Джерела з Бібліотеки 3 Сторінка 60

0.32% Цитат

Цитати 2 Сторінка 61

Не знайдено жодних посилань

0% Вилучень

Деякі джерела вилучено автоматично (фільтри вилучення: кількість знайдених слів є меншою за 8 слів та 0%)

Немає вилучених Інтернет-джерел

0% Вилученого тексту з Бібліотеки 1 Сторінка 61

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 50

Підозріле форматування 9 сторінок

Tue Jun 13 02:37:14 EEST 2023, Федула Микола Васильович, Хмельницький національний університет, ХНУ

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. **Помилоч в документах: 13%**

| | | | | |
|---|----------|---------|-----------------------------|---------|
| ID: 115815 Назва: БКР Антена МІМО для мобільних телефонів 5G Додано в БД: 2023-06-13 Автора: Андрій ДАЦИШИН Керівники: Валерій МАРТИНЮК Консультанти: Опоненти: | Документ | | Сумарний збіг по Базі Даних | |
| | Символи | Лексеми | Символи | Лексеми |
| | 57661 | 875 | 969 (2%) | 14 (2%) |

Джерело плагіату

| ID | Опис | Наявність плагіату в документі | |
|----|------|--------------------------------|---------|
| | | Символи | Лексеми |
| | | | |

МІНІСТЕРСТВО ОВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Дацшин Андрій Володимирович

Тема роботи: Антенна МІМО для мобільних телефонів 5G

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 60

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Метою кваліфікаційної роботи є підвищення пропускну здатності каналу та ефективності антени МІМО із збагаченням ізоляції для мобільних телефонів 5G. У даній роботі проведено огляд еволюції мереж мобільного зв'язку, розглянуто ключові базові технології для мереж 5G та інших мереж; досліджено антену МІМО із збагаченням ізоляції для мобільної зв'язку 5G та проведено моделювання антени МІМО із збагаченням ізоляції.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: У відповідності до технічного завдання в першому розділі представлено подробиці про еволюцію стільникових мереж від першого покоління до мереж шостого покоління. Другий розділ містить уявлення про ключові базові технології для мереж 5G. Переваги Massive МІМО пояснюються в третьому розділі, а четвертий розділ містить короткий опис важливості Massive МІМО для мереж майбутнього покоління. Розроблена антенна решітка МІМО містить вісім E-подібних і перевернутих I-подібних прорізів на матеріалі з хорошою електро- та теплопровідністю. Щоб збільшити смугу пропускання, необхідні резонанси були отримані за допомогою регулювання E-подібних слот. Крім того, щоб підсилити екранування елемента антенної системи МІМО, між кожним елементом антени введено односторонній проріз у формі ключа. У результаті всі елементи можуть покривати широку смугу частот із діапазоном частот від 3,3 ГГц до 6 ГГц. . У результаті всі елементи можуть покривати широку смугу частот із діапазоном частот від 3,3 ГГц до 6 ГГц. Ізоляція підвищується до 20 дБ за допомогою одностороннього слота у формі ключа, а ЕСС нижче 0,04 вимірюється між будь-якими двома елементами, які демонструють прийнятний імпеданс у характеристиках випромінювання дальньої зони.

4. Позитивні сторони роботи: Результати виконаної роботи показали, що необхідно проводити подальші дослідження в даному напрямку та рухатися шляхом удосконалення антенних решіток MIMO. Напрямок досить перспективний і попит на дані компоненти з кожним днем тільки зростатиме.

5. Негативні сторони роботи: У роботі бажано було б більш детально розглянути систему Massive MIMO. Присутні невеликі граматичні помилки. Однак, ці недоліки не мають принципового значення, суттєво не впливають на кінцевий результат і не знижують загального враження від проведеної роботи.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає


7. Відгук про роботу в цілому: В цілому кваліфікаційно робота виконано на високому технічному рівні, вона має безперечну актуальність в області сучасних технологій телекомунікацій

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка кваліфікаційної роботи: Кваліфікаційна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки добре (3,25/D), а її автору Дацишину А.В., присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Мішан Віктор Володимирович –к.т.н., доцент кафедри ТМІТ

«13» червня 2023р.



підпис

Завідувачу кафедри АКІТтаР
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Дацишин А.В.

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи ТР1-19-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

09.06.23

дата



підпис

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Антенa МІМО для мобільних телефонів 5G

Автор: Дацишин Андрій Володимирович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма: Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

Науковий керівник: д.т.н., професор, Мартинюк В.В.

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

| № | Висновок | Позначка про відповідність |
|---|---|----------------------------|
| 1 | Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту. | <u>Відповідає</u> |
| 2 | Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи | |
| 3 | Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат. | |
| 4 | Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту. | |
| 5 | Інше: | |

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 4,54% і адресується до 56 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

14.06.23

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Валерій МАРТИНЮК

Денис МАКАРИШКІН

Валерій МАРТИНЮК