

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (магістерський)

Освітній рівень

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

на тему Синтез антенної рознесеної МІМО-решітки для мобільної мережі 5G

ДРТР. 05921.05.05 ПЗ

Виконав:

студентка 2 курсу, група ТРМ-21-1


підпис

Інна ЛОБАЧОВА

Ініціали, прізвище

Керівник: канд. техн. наук, доцент


підпис

Віктор МІШАН

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, професор


підпис

Сергій ПІДЧЕНКО

Ініціали, прізвище

«05» грудня 2022р.

Хмельницький, 2022

Хмельницький національний університет

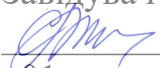
Факультет *інформаційних технологій*

Кафедра *телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій*

Спеціальність *172 – Телекомунікації та радіотехніка*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру ТМІТ

 Сергій ПІДЧЕНКО

«01» грудня 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

ЛОБАЧОВІЙ Інні Володимирівні

1 Тема роботи: Синтез антенної рознесеної МІМО-решітки для мобільної мережі 5G

керівник роботи Мішан Віктор Володимирович, к.т.н, доцент.

Затверджено наказом по університету від «01» липня 2022 р. № 83.

2 Строк подання студентом роботи на кафедру: 01.12.2022 р.

3 Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи: аналіз методів множинного доступу в бездротовому зв'язку для передачі даних від одного пристрою до іншого через радіоресурси.

Предметом дослідження: є аналіз методів використання мобільного та бездротового зв'язку в інформаційному суспільстві.

Об'єктом дослідження: є перспективи застосування міліметрових хвиль для мережі 5G.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):

1 Перспективи використання міліметрових хвиль для мережі п'ятого покоління

2 Методи множинного доступу

3 Передові антенні системи для розгортання мережі 5G


4 Моделювання ортогональної подвійної поляризованої антенної решітки МІМО

Науковий керівник  Віктор МІШАН

Завдання отримав  Інна ЛОБАЧОВА

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедрою ТМІТ


 Сергій ПІДЧЕНКО
 «07» вересня 2022 р.


ПЛАН ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РОБОТИ

№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на дипломну роботу	07.09.2022р.	<i>виконано</i>
2.	Складання індивідуального плану на дипломну роботу	15.09.2022р.	<i>виконано</i>
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	20.10.2022р.	<i>виконано</i>
4.	Написання другого розділу	05.11.2022р.	<i>виконано</i>
5.	Написання третього розділу	20.11.2022р.	<i>виконано</i>
6.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до дипломну роботу	28.11.2022р.	<i>виконано</i>
7.	Формулювання висновків до роботи	30.11.2022р.	<i>виконано</i>
8.	Підготовка матеріалів для апробації	30.11.2022р.	<i>виконано</i>
9.	Оформлення пояснювальної записки до ДР	30.11.2022р.	<i>виконано</i>


Примітки:

1. _____
2. _____

Науковий керівник


 (підпис, дата)
Віктор МІШАН

Студент


 (підпис, дата)
Інна ЛОБАЧОВА

АНОТАЦІЯ

Тема дипломну роботу: «Синтез антенної рознесеної МІМО-решітки для мобільної мережі 5G»

Автор роботи: ЛОБАЧОВА Інна Володимирівна

Керівник роботи: канд. техн., доц. МІШАН Віктор Володимирович.

Пояснювальна записка: 83 сторінок, 33 рисунків, 3 таблиць, 50 джерела, 2 додатки.

Графічна частина: 18 презентаційних слайдів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АНТЕНА МІМО, ДІАГРАМА СПРЯМОВАНОСТІ, ФАЗОВАНА РЕШІТКА, ПОЛЯРИЗАЦІЯ, СМУГА ПРОПУСКАННЯ, 5G СМАРТФОНИ.

Метою дипломної роботи є аналіз методів множинного доступу в бездротовому зв'язку для передачі даних від одного пристрою до іншого через радіоресурси.

В дипломній роботі представлено нову конструкцію антени МІМО з випромінювачами з ортогональною подвійною поляризацією для смартфонів 5G. Її конфігурація використовує вісім портів/чотири випромінювачі модифікованих круглих кільцевих випромінювачів, розташованих на чотирьох краях материнської плати мобільного телефону. Частота роботи випромінювачів становить від 3,3 до 3,9 ГГц з резонансом 3,6 ГГц. Досліджуються фундаментальні властивості конструкції антени смартфона, включаючи S-параметр, ефективність, діаграми спрямованості, результати ECC і TARC. Зразок прототипу розробленої МІМО-антени було виготовлено та надано їй вимірювання.

ANNOTATION

Topic of the thesis: «Synthesis of an antenna diversity MIMO array for a 5G mobile network»

The author of the work: LOBACHOVA Inna V.

Supervisor: candidate of technical sciences, docent MISHAN Viktor V.

Explanatory note: 83 pages, 33 figures, 3 tables, 50 sources, 2 appendices.

Graphic part: 18 presentation slides.

KEY WORDS: MIMO ANTENNA, DIRECTIVITY PATTERN, PHASE Grating, POLARIZATION, PASS BAND, 5G SMARTPHONES.

The aim of the thesis is the analysis of multiple access methods in wireless communication for data transmission from one device to another through radio resources.

The thesis presents a new design of a MIMO antenna with emitters with orthogonal dual polarization for 5G smartphones. Its configuration uses eight ports/four emitters of modified circular ring emitters located on the four edges of the mobile phone motherboard. The operating frequency of the emitters is from 3.3 to 3.9 GHz with a resonance of 3.6 GHz. Fundamental properties of smartphone antenna design are investigated, including S-parameter, efficiency, directional patterns, ECC and TARC results. A prototype sample of the developed MIMO antenna was fabricated and its measurements provided.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	9
1 ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ ДЛЯ МЕРЕЖІ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ.....	12
1.1 Загальна характеристика та особливості мережі 5G.....	12
1.2 Аналіз розвитку мережі п'ятого покоління	15
1.3 Гібридні системи зв'язку.....	20
1.4 Аналіз технічних вимог та енергетичних параметрів для впровадження технології 5G.....	22
1.5 Обробка радіочастотного сигналу та можливість об'єднання бездротового та оптоволоконного зв'язку	25
Висновки	28
2 МЕТОДИ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ	29
2.1 Огляд існуючих рішень	29
2.1.1 Ортогональний множинний доступ	30
2.1.2 Неортогональний множинний доступ	33
2.1.3 Безгрантовий множинний доступ	35
2.2 Множинний доступ та надмасивне підключення.....	37
2.3 Множинний доступ та надійне формування променя	38
Висновки	39
3 ПЕРЕДОВІ АНТЕННІ СИСТЕМИ ДЛЯ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖІ 5G.....	40
3.1 Просторове рознесення та просторове мультиплексування	40
3.2 Multi-користувацьке MIMO	42
3.3 Переваги масивного MIMO	43
3.4 Ультрамасивний MIMO	45
3.4.1 Огляд існуючих рішень.....	46
3.4.2 Технології MIMO для FR1	46
3.4.3 Технології MIMO для FR2.....	48

	7
Висновки	49
4 МОДЕЛЮВАННЯ ОРТОГОНАЛЬНОЇ ПОДВІЙНОЇ ПОЛЯРИЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ МІМО.....	50
4.1 Одноелементна/двополярна антена	52
4.2 Конструкція антени МІМО для смартфона 5G.....	58
4.3 Вплив користувача на характеристики антени.....	67
4.4 Дводіапазонна/багатодіапазонна характеристика запропонованої конструкції кільцевої щілинної антени	72
4.5 Інтеграція міліметрової хвилі фазованої решітки в запропоновану антену смартфона МІМО	75
Висновки	79
ВИСНОВКИ.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	82
ДОДАТКИ.....	87

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CC	–	channel capacity
CDMA	–	множинний доступ із кодовим поділом
CL	–	channel loss
ECC	–	envelope correlation coefficient
FDMA	–	частотним поділом
GB	–	grant-based
GF	–	grant-free
GSM	–	Global System for Mobile Communications
HSPA	–	High Speed Packet Access
IF	–	проміжна частота
LTE	–	Long-Term Evolution
MA	–	multiple access
METIS	–	Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society
MIMO	–	multiple-input and multiple-output
mm-Wave	–	millimetre-wave
NOMA	–	nonorthogonal multiple acces
OFDMA	–	множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів
OMA	–	orthogonal multiple access
PCB	–	Printed circuit board
SDMA	–	множинний доступ із просторовим поділом каналів
SDN	–	Software Defined Networks
SDR	–	Software Defined Radio
TARC	–	total active reflection coefficien
TDMA	–	множинний доступ із тимчасовим поділом

ВСТУП

Технологія довгострокового розвитку (LTE) поступово стає стандартною для мобільних мереж, мобільного зв'язку 5G та майбутніх технологій 6G привернув багато інтересів в останні роки [1]. Оскільки мобільного зв'язок 5G/6G потребуватиме вищої швидкості передачі даних і стабільнішої якості сигналу, система з кількома входами та багатьма виходами (MIMO) для мобільних телефонів привернула багато уваги завдяки своїй хорошій продуктивності у покращенні швидкості передачі даних.

Метод множинних входів/множинних виходів (MIMO) може експоненціально збільшити швидкість передачі даних і ефективність використання спектра без необхідності збільшення потужності передачі та пропускної здатності [1]. Це найперспективніша технологія, яка буде використовуватися в майбутньому зв'язку 5G [2, 3]. Щоб бути більш точним, смартфони четвертого покоління (4G) налаштовані використовувати довгострокову еволюцію технології MIMO та працювати в кількох діапазонах. Тому антени MIMO повинні використовуватися в майбутніх портативних пристроях, таких як мобільні телефони та планшети [4].

Згідно з вимогами мобільного зв'язку, низькопрофільні, ширококутові антенні елементи з достатнім взаємним зв'язком є нагальною потребою в терміналах 5G для портативних пристроїв [5–8]. Оскільки простір портативного пристрою обмежений, конфігурацію кількох антен важко встановити в такому обмеженому пристрої [9, 10]. Таким чином, інтеграція кількох елементів антени в мобільний телефон є новим викликом. Нещодавно було запропоновано декілька типів MIMO антен для смартфонів для мобільних терміналів нижче 6 ГГц [11–22]. Ці конструкції антен для смартфонів або мають вузький робочий діапазон, використовують випромінювачі з одним живленням/одною поляризацією, або використовують одноплосинні структури, які займають великі місця на друкованій платі смартфона і призводять до збільшення складності системи.

Отже, багатоблокова система MIMO є однією з основних технологій для роботи 5G/6G [2]. Незважаючи на те, що впровадження багатоблокової технології MIMO збільшить пропускну здатність каналу [3, 4], розміщення великої кількості антен в обмеженому просторі (забезпеченому смартфоном) також призведе до погіршення ізоляції та ефективності випромінювання [5]. Таким чином, як інтегрувати кілька антен із хорошими характеристиками в смартфон 5G, зараз є новою складною темою для розробників антен.

Актуальність роботи полягає у аналізі методів множинних виходів/множинних виходів MIMO.

Метою дипломної роботи є аналіз методів множинного доступу в бездротовому зв'язку для передачі даних від одного пристрою до іншого через радіоресурси.

Метод дослідження – на основі теоретичного дослідження, порівняльного аналізу характеристик антенних решіток MIMO.

Об'єктом дослідження є перспективи застосування міліметрових хвиль для мережі 5G.

Предметом дослідження є аналіз методів використання мобільного та бездротового зв'язку в інформаційному суспільстві

Для досягнення мети використані **методи** множинного доступу в бездротовому зв'язку для передачі даних від одного пристрою до іншого через радіоресурси.

Наукова новизна отриманих результатів: представлено нову конструкцію антени MIMO для смартфонів майбутнього.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Проведено аналіз методів використання мобільного та бездротового зв'язку в інформаційному суспільстві;
2. Досліджено фундаментальні властивості конструкції антени смартфона, включаючи S-параметр, ефективність, діаграми спрямованості, результати ECC і TARC. Зразок прототипу розробленої MIMO-антени було виготовлено та надано її вимірювання;

3. Представлено конструкцію антени смартфона МІМО з компактними випромінювальними елементами, високою ефективністю та широкою смугою пропускання для додатків 5G 3,6 ГГц.

3. Наведені характеристики антени в присутності користувача.

4. Запропонована антенна решітка смартфона також може генерувати дво- або багатодіпазонну характеристику. Крім того, завдяки наявності вільного простору в конструкції антени смартфона, компактну мм-хвильову фазовану антену з широкою смугою пропускання та кінцевими пучками випромінювання можна легко опитувати на антені смартфона 5G.

За темою дипломної роботи опублікована одна стаття у науковому журналі "Вісник Хмельницького національного університету" № 6 за 2022 р., серія "Технічні науки", який включено до наукометричних баз (Index Copernicus, Google Scholar)

1 ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ ДЛЯ МЕРЕЖІ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

1.1 Загальна характеристика та особливості мережі 5G

Свого часу Міжнародний союз електрозв'язку закликав мобільне співтовариство не висловлюватися порядковими номерами поколінь систем ІМТ, посилаючись на те, що раніше введені терміни «Наступні системи» («ІМТ і наступні системи») і «майбутній розвиток ІМТ-2000» використовувалися тимчасово. Резолюція ІТУ-R № 56 «Визначення назв для міжнародних мобільних телекомунікацій» пояснює взаємозв'язок між термінами «ІМТ-2000» і «майбутній розвиток ІМТ-2000» і надає нові назви систем, які включають нові радіоінтерфейси з можливостями низхідної системи. Згідно з цією резолюцією, використання терміну ІМТ-2000 все ще є доречним для опису ІМТ-2000, і, крім того, його слід розуміти як вдосконалення та майбутній розвиток цих систем. Термін «ІМТAdvanced» слід застосовувати до систем, компонентів системи та пов'язаних аспектів, включаючи нові радіоінтерфейси, що підтримують нові можливості майбутніх систем. Коренева назва «ІМТ» охоплює як ІМТ-2000, так і ІМТ-Advanced.

«5G» (5-е покоління мобільних мереж або 5-е покоління бездротових систем) – назва, яка зараз неофіційно використовується в деяких проектах для позначення наступних стандартів мобільного зв'язку, які продовжують стандарти попередніх поколінь (офіційний 3G і умовно представлений 4G). Таким чином, 5G не є офіційним терміном для будь-якої конкретної специфікації, і, як наслідок, нові стандарти для подальшого розвитку поточних систем LTE не розглядаються органами стандартизації як нове покоління систем мобільного зв'язку, а вважаються лише частиною чинні стандарти. Що стосується технологій, то єдину позицію в цьому питанні висловлює компанія Ericsson. У цьому документі зазначається, що сьогодні існує низка додатків, які вимагають дуже низьких мережевих затримок (дистанційне зондування,

безпека руху, контроль промислових процесів тощо), високого рівня надійності мережі (керування критичною інфраструктурою – мережі електропередачі, промисловий контроль). та забезпечення таких життєво важливих соціальних функцій, як транспорт, телемедицина, управління «Розумним» містом і домом), а також відповідні формати для швидкої передачі різних обсягів даних (великі обсяги – при дистанційному відеоспостереженні, малі – при відстеженні переміщення товарів і т.д.). У розробці цієї позиції визначено ряд специфічних вимог, які не можуть бути задоволені за допомогою існуючих мереж зв'язку.

До них належать:

- швидкість доставки даних користувача в будь-яку точку в сотнях мегабіт в секунду;

- надвисока пропускна здатність (кілька гігабіт на секунду) у певних сценаріях; цього можна досягти в мережах з надщільною архітектурою з дуже широкою смугою радіоканалу (кілька сотень мегагерц) у більш високих діапазонах частот (10-100 ГГц);

- підключення великої кількості пристроїв зв'язку машинного типу з низьким енергоспоживанням. Цей аспект уже розглядається в стандартах LTE, але на даному етапі буде важко розробити LTE таким чином, щоб задовольнити всі додатки з їхніми специфічними вимогами – потрібні альтернативні технології, які повністю забезпечують підключення пристроїв з обмеженим споживанням електроенергії;

- найближчий зв'язок, коли необхідно підтримувати комунікацію між близько розташованими користувачами або об'єктами (наприклад, між транспортними засобами для безпеки дорожнього руху). Такий зв'язок може бути більш ефективним, якщо обмін інформацією здійснюється безпосередньо між пристроями (Device-toDevice, D2D), минаючи мережеву архітектуру;

- ефективне використання спожитої електроенергії, що в майбутньому стане ще більш важливим і має істотно вплинути на проектування мережі радіодоступу в 5G.

Основні вимоги до 5G можна розділити на кілька областей, і оскільки вони сьогодні знаходяться на стадії попереднього бачення, вони мають загальний характер: «про що має бути». Вимоги до 5G у форматі виділяють чотири домени:

- новий радіоінтерфейс із малими осередками (New Air Interface (Small Cells)) має базуватися на нових формах хвилі (New waveform), нових типах дуплексу (New duplexing), простих і гнучких протоколах канального рівня (Light MAC), високій модуляції. порядок (модуляція вищого порядку), ефективні методи компенсації внутрішньосистемних перешкод (Interference cancelation/utilization) та багатовимірні антенні системи (MassiveMIMO);

- оновлена архітектура радіомережі (New NW Architecture) – розподіл і керування ресурсами в гетерогенній архітектурі HetNet (HetNet resource allocation & management), реконфігуроване радіо та елементи мереж SDR і SDN (Software Defined Radio, Software Defined Networks), передача, призначена для користувача, даних і керуючої інформації (сервісних команд) у різних фізичних середовищах (фізичне розділення між площинами даних і керування);

- радіочастота – використання діапазонів високих частот, включаючи міліметрові хвилі, новий режим ліцензування, ліцензовану та неліцензовану роботу діапазонів, спільне використання спектру), комбіноване використання спектру в приміщенні та у зовнішньому середовищі (робота в приміщенні та на вулиці);

- інтелектуальні та адаптивні мережі (Intelligent & Adaptive Networks) – адаптивне використання мережевих ресурсів (Opportunistic & adaptive use of resources), ідентифікація доступного спектру (Spectrum sensing) та його використання на принципах когнітивного радіо (Cognitive radio and network), самокеровані (незалежні) та автоматизовані мережі (Selfmanagement and automated networks, Automation (Plug & play)).

Однак сьогодні, за відсутності навіть попередніх специфікацій для мереж 5G, занурення в технічні подробиці виглядає передчасним. Тому ми

перерахуємо ряд характеристик, які відрізнятимуть мережі п'ятого покоління від їхніх попередників:

- розподілений доступ до гігантської пропускної здатності;
- покращені інтерфейси білінгових систем, що значно спрощує роботу;
- дистанційна діагностика проблем в мережі, що дозволить швидко усувати аварійні ситуації;
- спеціальні засоби моніторингу роботи абонентів, які дозволять оперативно реагувати на їхні труднощі та прийти на допомогу;
- високоякісні послуги на основі спеціальних полісів;
- підтримка до 65 тисяч одночасних підключень на одну базову станцію;
- підтримка віртуальних приватних мереж.

1.2 Аналіз розвитку мережі п'ятого покоління

Незважаючи на те, що перша мережа 4G була запущена в Норвегії ще 4 роки тому, Європа все ще сильно відстає від Америки та Азії за рівнем проникнення широкосмугового Інтернету. Так, за оцінками GSMA, у 2013 році цей показник у країнах ЄС становив лише 59% (виняток становить Швеція з традиційно високим рівнем проникнення широкосмугового доступу – 128%) порівняно з 82% у США, 108% у Південній Кореї, 112% в Японії і 78% в розвинених країнах. Прагнучи наздогнати, рік тому Європейський Союз виступив з ініціативою створити першу робочу групу для розробки концепції побудови мереж п'ятого покоління 5G [11,12].

Проект METIS («Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society» – «Методи використання мобільного та бездротового зв'язку в інформаційному суспільстві 2020») включав п'ять виробників разом зі шведською компанією Ericsson, 5 комунікаційних операторів, 13 і наукових організацій. і одна вантажівка. За два з половиною роки, відведені на проект, його учасники повинні виробити основні особливості, зрозуміти, на основі яких технологій мають бути сумісні нові

мережі. Оптимізація та стандартизація обладнання, а також перші пілотні запуски заплановані на 2015-2018 роки, а розгортання перших некомерційних мереж 5G в дослідну експлуатацію очікується на 2018-2020 роки. Таким чином, комерційний запуск мереж п'ятого покоління відбудеться не раніше 2020 року [11,12].

Проект METIS («Mobile and Wireless Communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society», «Методи використання мобільного та бездротового зв'язку в інформаційному суспільстві 2020») включав п'ять виробників разом зі шведською компанією Ericsson, 5 операторів, 13 дослідницьких організацій. і один авто гігант. За два з половиною роки, відведені на проект, його учасники повинні розробити базову концепцію, зрозуміти, на яких технологіях будуть розгортатися нові мережі і яким вимогам вони повинні відповідати. Оптимізація та стандартизація обладнання, а також перші досліджувальні запуски заплановані на 2015-2018 роки, а розгортання перших некомерційних мереж 5G в експлуатацію очікувалось на 2018-2020 роки. Таким чином, комерційний запуск мереж 5G відбулося в 2020 році [11,12].

Мережі п'ятого покоління вирішують ті завдання, які сьогодні є складними для більшості операторів зв'язку, і незабаром вони стануть критичними із зростанням трафіку. Мова йде, наприклад, про забезпечення ідеальної якості зв'язку та передачі будь-якої кількості даних на стадіоні чи концерті, під час медичної операції чи регулювання дорожньої ситуації, а також про величезну кількість ситуацій, про які ми можемо тільки здогадуватися.

З'являються нові сценарії розгортання мережі, зокрема, все більше операторів є прихильниками стратегії розгортання малих сот. Крім того, як відзначають в Ericsson, відбудуться зміни в комунікаційній парадигмі в бік посилення дії міжмашинної взаємодії.

Нові системи повинні забезпечувати гігабітну швидкість передачі даних (у 10-100 разів вищу за теперішні), мати незрівнянно більшу ємність, щоб задовольняти зростання споживання трафіку в 1000 разів (до 500 ГБ на місяць)

зі збільшенням підключених пристроїв у 10-100 разів. Вони повинні бути супернадійними і забезпечувати миттєву передачу даних (час відгуку – в мілісекундах), а також тривалу роботу пристроїв з низьким енергоспоживанням.

Все, що може отримати вигоду від підключення до мережі, з часом буде підключено, прогнозують експерти, від побутової техніки та світлофорів до автомобілів, медичного обладнання, енергосистем, датчиків вітру та дощу. Завдання мереж п'ятого покоління – забезпечити впровадження цих технологій.

Що стосується технічних характеристик, то поки що можна лише сказати, що на відміну від попередніх мереж, нові системи використовуватимуть існуючі технології мобільного та бездротового зв'язку (GSM, HSPA, WiFi, LTE-A), доповнюючи їх новими технологіями радіодоступу, призначеними для коженно окремого сценарію. Відкритим також залишається питання використовуваного радіочастотного спектру. Для задоволення сформульованих вимог необхідне надщільне розгортання мереж, базові станції яких використовуватимуть дуже широку смугу пропускання (кілька сотень МГц з можливістю розширення до кількох ГГц) у верхніх діапазонах частот – 10–100 ГГц. Мережі складатимуться з базових станцій малої потужності, які будуть встановлені на вулиці на відстані ліхтарних стовпів, у приміщеннях – у кожній кімнаті. Незайняті смуги високих частот полегшують забезпечення широкої смуги пропускання, а також більше підходять для передачі даних на короткі відстані.

Стрімкий розвиток інформаційних технологій іноді перевершує всі наші очікування та найсміливіші фантазії, тому навряд чи можна точно передбачити, які відкриття чекають на нас у найближчі 10 років. Проте сьогодні учасники проекту METIS розробляють сценарії, моделюють ситуації, визначають потреби кінцевого користувача та намагаються зрозуміти, які технології зможуть повноцінно вирішити ті завдання, які постануть перед операторами зв'язку в самому найближчому майбутньому. Незважаючи на те,

що питань поки що більше, ніж відповідей, ясно одне: впровадження мереж п'ятого покоління стане наступним революційним кроком у розвитку цифрового простору, який радикально вплине на всі сфери життя та бізнесу. А лідером буде той, хто раніше за інших зможе розглянути і використати відкриття на цьому етапі можливості.

Сьогодні найкращою технологією мобільного зв'язку вважається LTE (Long Term Evolution) – мережі четвертого покоління (4G). Вона забезпечує теоретичну швидкість передачі даних до 326 Мбіт/с у напрямку від базової станції до клієнтського пристрою. На ринку існує близько 700 різних LTE-сумісних пристроїв, включаючи USB-модеми та маршрутизатори Wi-Fi. І хоча LTE є досить новою технологією, вже розробляються мобільні мережі п'ятого покоління (5G), які обіцяють у десятки разів вищу пропускну здатність.

Samsung, серед інших працює над мережею 5G. Для високошвидкісної передачі даних пропонується використовувати міліметровий діапазон радіохвиль із частотою від 3 до 300 ГГц. За оцінками Samsung, регулюючі органи можуть дозволити використання спектра завширшки до 100 ГГц. Теоретично мобільні мережі п'ятого покоління дозволять передавати інформацію зі швидкістю до 10 Гбіт/с, що задовольнить будь-які сучасні потреби у завантаженні контенту.

Перевагами міліметрової хвилі є дуже висока пропускну здатність каналів зв'язку і квазіоптична форма поширення випромінювання, при якій відсутні перешкоди і пов'язані з ними перешкоди. Однак використання радіохвиль міліметрового діапазону загрожує деякими проблемами. Справа в тому, що такі сигнали втрачають енергію при передачі на великі відстані: зокрема, загасання відбувається внаслідок поглинання електромагнітного випромінювання молекулами кисню та води [14, 15]. Samsung пропонує обійти труднощі, використовуючи спеціалізований масив антен. Компанія розробила прототип електронної системи з 64 антенами, що пов'язані зі схемами обробки сигналу. Цей трансивер здатний генерувати сигнал шириною 10 градусів із динамічною зміною напрямку передачі. Експерименти показали, що система

дозволяє обмінюватися даними на швидкості понад 1 Гбіт/с з двома рухомими приймачами зі швидкістю близько 8 км/год. Відстань в цьому випадку становить приблизно 2 км при прямій видимості. У мережах зв'язку п'ятого покоління домінуватимуть не високі швидкості передачі даних, а диференційований підхід до різних пристроїв і орієнтація на кінцевий сервіс. Хоча стільникові оператори тільки починають розгортати мережі 4G на LTE, у лабораторіях вже ведуться дослідження для наступного покоління мереж 5G.

Мережі 5G обслуговуватимуть велику кількість мобільних пристроїв, починаючи від телефонів, смартфонів, планшетів і закінчуючи, наприклад, різноманітними датчиками (автономними датчиками температури, HD-камерами спостереження, які транслюють великий потік відео онлайн). Оскільки пристрої різні та їхні швидкості передачі різні, різні пристрої мають різні запити щодо якості мережі. Сьогодні такі запити задовольняють лише провідні мережі. У стільникових мережах сьогодні немає гарантії заявленої якості мережі. У мережах 5G буде в 10-15 разів більше кінцевих пристроїв, які не є мобільними телефонами. І розвиток мереж 5G буде залежати від їх здатності працювати з різними пристроями.

Зараз стільникові оператори намагаються збільшити швидкість передачі даних, але це не головним завданням. Важливо, щоб всі програми працювали саме з тією швидкістю, з якою це необхідно, яку очікує користувач. При таких обіцяючих перспективах залишається тільки гадати, чи довго абонентам доведеться задовольнитися роботою в мережах 4G? Для користувачів, які ще не оцінили можливості мереж 4G, питання явно не суттєве. Існує твердження, згідно з якого нове покоління мереж мобільного зв'язку з'являється приблизно раз на 10 років. Перші такі мережі з'явилися у 1981 році, мережі 2G – у 1992 році, мережі 3G – у 2001 році, а перша мережа четвертого покоління (LTE) була запущена у Швеції компанією TeliaSonera в кінці 2009 року. До речі, у 2008 році, майже одночасно з розгортанням перших мереж pre-4G, у Південній Кореї була запущена програма досліджень і розробок 5G, хоча автору не вдалося знайти звітів про досягнуті результати за минулі роки. Можливо, з

цієї причини в жовтні 2012 року в британському Університеті Суррея був заснований дослідницький центр мережі 5G за підтримки одного з інвестиційних фондів уряду Великобританії, виробників інфраструктурного обладнання Fujitsu, Huawei, Rohde & Schwarz, Samsung і Telefonica Europe. [11,12,15].

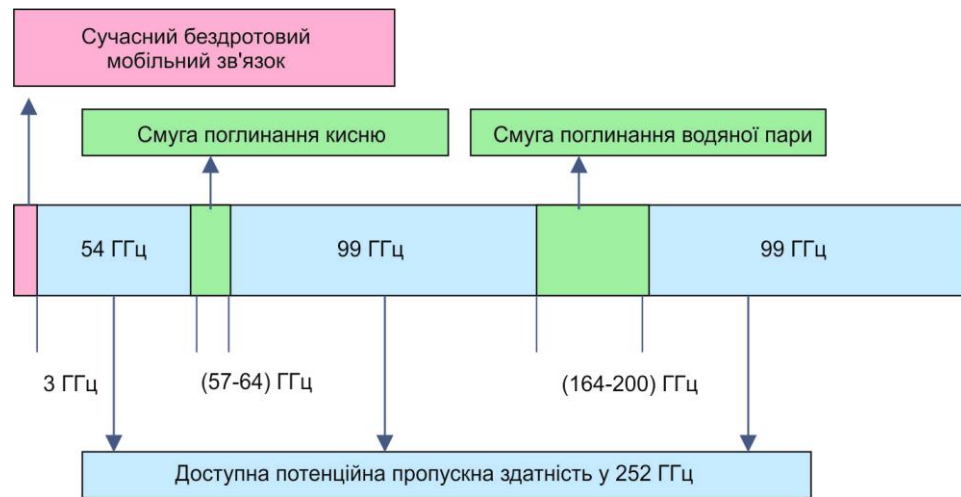


Рисунок 1.1 – Спектр в mmWave: діапазони, доступні для ширококутового мобільного зв'язку;

1.3 Гібридні системи зв'язку

Гібридна система ММВ-4G зможе покращити покриття та гарантувати безперебійний зв'язок для мобільних користувачів. На початковому етапі розгортання мережі ММВ щільність БС буде низькою, тому розриви в зоні покриття мережі неминучі. Однак до того часу, коли ММВ буде широко розгорнуто, встановлені системи 4G, як очікується, забезпечуватимуть добре покриття та надійність. У гібридних мережах ММВ-4G системна інформація, службові канали зв'язку та зворотній зв'язок передаються по каналах 4G, а також високошвидкісні потоки даних у міліметровому діапазоні.

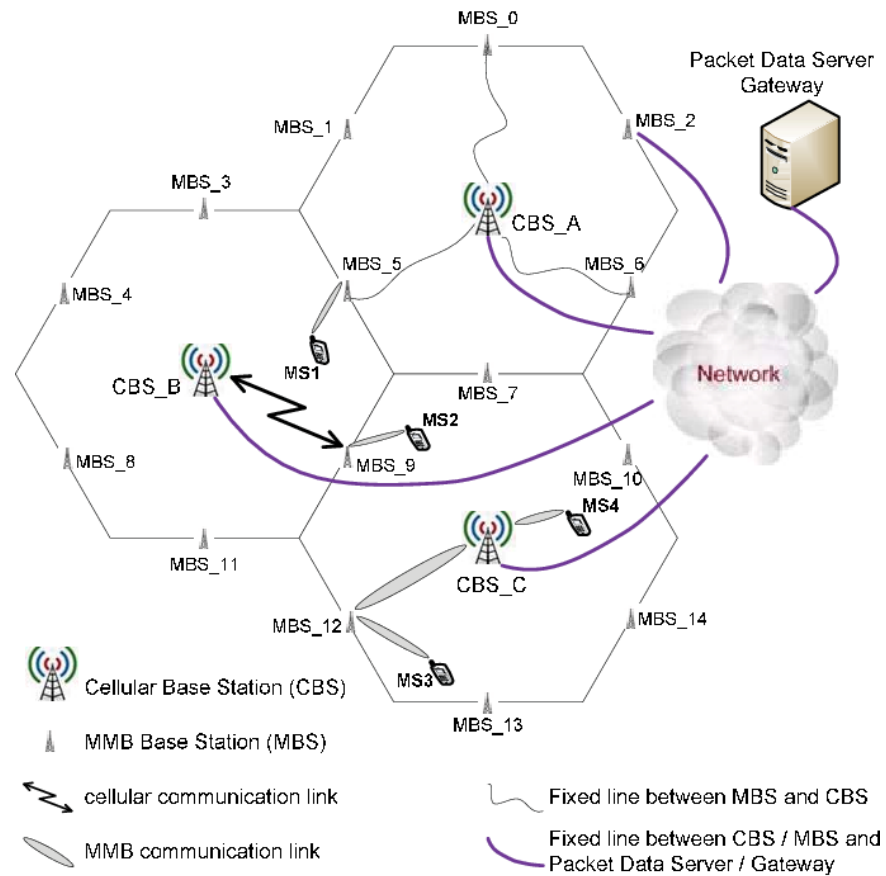


Рисунок 1.2 – Гібридна мобільна мережа ММВ-4G

У порівнянні з міліметровою хвилею, радіохвилі в діапазоні до 3 ТГц краще пропускають перешкоди і дозволяють працювати поза зоною прямої видимості або при ослабленні сигналу іншої природи (різні середовища розповсюдження, дощ тощо). Так, у гібридній мережі для передачі службової інформації вигідно використовувати частотні канали стільникового зв'язку, а для високошвидкісної передачі даних – міліметрові.

Гібридні системи зв'язку на даному етапі розвитку фотоніки та електроніки, а саме поєднання електронних та оптичних пристроїв, дає змогу досягти рекордних швидкостей передачі даних. Так, при необхідності передачі ТГц сигналів (0,1-10 ТГц) на великі відстані, коли ТГц випромінювання вже сильно ослаблене в атмосфері, використовується технологія модуляції на частотах ТГц оптичних сигналів, які передаються по волокну. При такому підході генерація ТГц сигналу здійснюється за допомогою фотонних

технологій. Використання оптоволоконних кабелів дозволяє передавати високочастотні радіосигнали на великі відстані. Крім того, безсумнівною перевагою фотонного підходу є те, що волоконно-оптичні та бездротові мережі зв'язку можуть бути з'єднані за швидкістю передачі інформації та форматом модуляції.

1.4 Аналіз технічних вимог та енергетичних параметрів для впровадження технології 5G

На думку провідних світових вендорів, мережі 5G повинні надати можливість збільшити обсяг переданих даних більш ніж у 1000 разів у кожній зоні обслуговування за рахунок підвищення спектральної ефективності, використання нових діапазонів радіочастот і неоднорідних мереж (питома пропускна здатність на одиницю зона покриття ASE = 1,5 ...60 Гбіт/с/км²); збільшити від 10 до 100 разів кількість підключених абонентських пристроїв (до 300 тис. на вузол доступу; на даний момент технологія LTE забезпечує роботу до 200 абонентів на комірку зі швидкостями 100/50 кбіт/с у низхідних/вихідних каналах відповідно); збільшити від 10 до 100 разів типову швидкість передачі даних на стороні користувача; в 10 разів більший час автономної роботи для абонентських пристроїв малої потужності; Зменшення затримки в 10 разів у «наскрізному» ланцюгу менше 1 мс проти 10 мс у LTE, таблиця 1.1.

Таблиця 1.1 – Підвищення основних технічних параметрів для мереж 5G

Швидкість передачі даних	Зростання від 10 до 100 разів на одного абонента – до 10 Гбіт/с (UL) і до 5 Гбіт/с (DL)
Споживаний трафік абонента	Зростання в 1000 разів – до 500 Гб на користувача на місяць
Кількість абонентських пристроїв	Збільшення кількості підключених абонентських пристроїв стільників на 10–

	100 (до 300 тис. на вузол). Зростання кількості пристроїв M2M з 50 мільярдів до 500 мільярдів
Термін життя батарей	У десять разів кращий час роботи батареї для пристроїв з низьким споживанням енергії, таких як датчики M2M
Затримки в мережі	Зменшення часу затримки в ланцюжку E2E з 5 місяців до 1 або менше
Енергоефективність	Зниження вартості експлуатації та енергоспоживання мереж 5G до 10% від поточного споживання мереж 4G

Аналіз необхідного радіочастотного ресурсу для впровадження технологічних рішень 5G. Реалізація вищевказаних технічних умов, особливо щодо збільшення швидкості передачі даних, потребує значного розширення доступу до RFS для операторів 5G та визначення нових діапазонів частот для розвитку мереж радіодоступу (рис. 1.3).

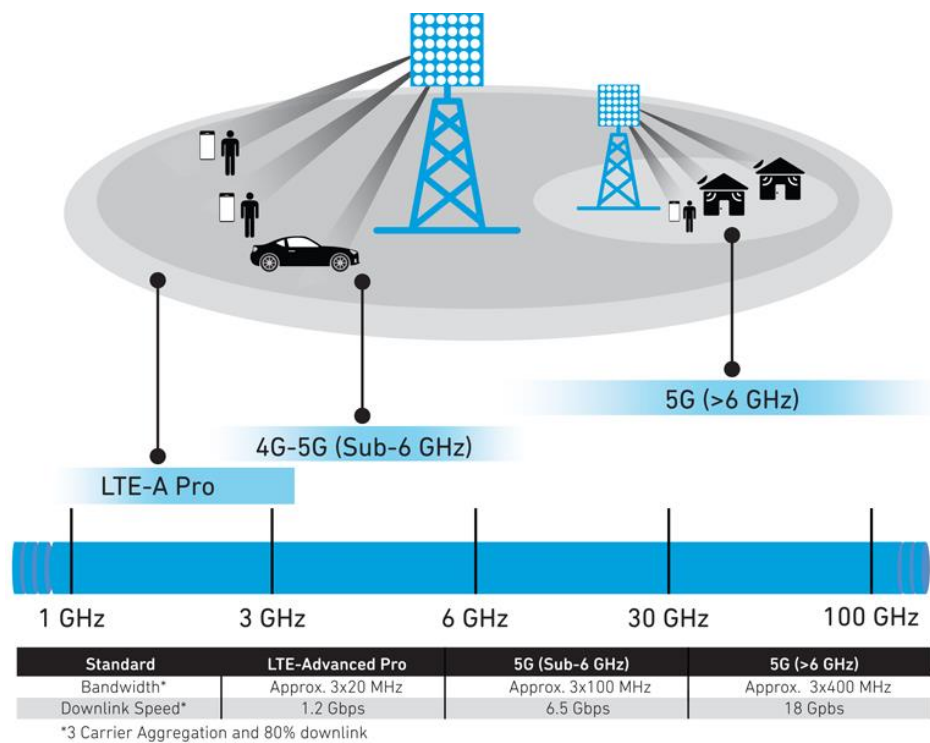


Рисунок 1.3 – Розширення спектра (ширини каналу) при переході до технології 5G

У діапазоні 3–300 ГГц для мобільного широкосмугового зв'язку можна використовувати частоти до 252 ГГц. Якщо виключити діапазони, в яких хвилі сильно поглинаються киснем і водяною парою атмосфери (57-64 ГГц і 164-200 ГГц), оскільки можливості передачі в них обмежені, то решта 40% спектра повинні достатньо для ММВ, що відповідають спектру 100 ГГц. Це більш ніж у 200 разів більше, ніж зараз використовується для мобільного зв'язку в діапазоні до 3 ГГц. Міліметровий діапазон відповідає частотному ресурсу 70 ГГц.

Е-діапазон складається з двох частотних діапазонів 71-76, 81-86 ГГц і 92-94 ГГц, де поглинання кисню становить менше 0,5 дБ км (див. рис. 1.4) і відкриває загалом 13 ГГц спектру радіочастоти, що робить їх ідеальним використанням для високошвидкісних каналів передачі даних на відстані до кількох кілометрів.

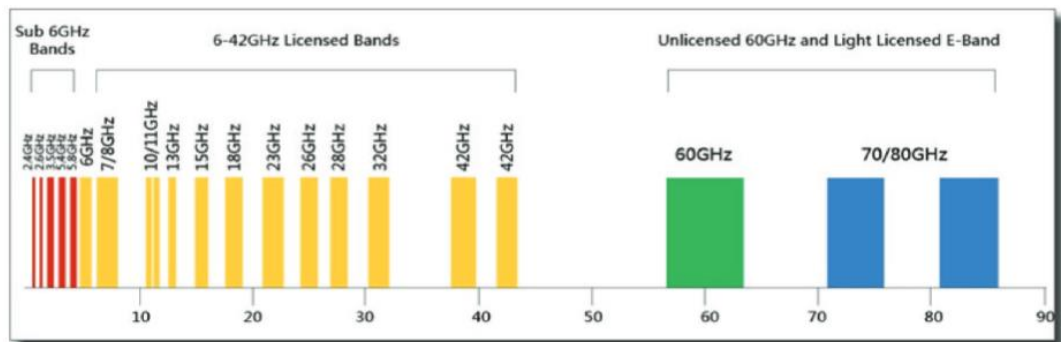


Рисунок 1.4 – Частоти виділені для мобільного зв'язку

З точки зору поширення радіохвиль, Е-діапазон подібний до діапазонів частот 38/42 ГГц і має типові діапазони порядку кількох кілометрів (точні значення розраховуються на основі очікуваної інтенсивності опадів і вимог до надійності).

Порівняння технічних вимог до мобільних мереж 4G і 5G.

Розширення смуги частотних каналів, які будуть використовуватися в 5G, і підвищення спектральної ефективності технологій дозволить на порядок збільшити швидкість передачі даних в мережі. Як випливає з табл. 1.1, мережі 5G використовуватимуть частотні канали шириною понад 100 МГц, а спектральна ефективність мереж 5G завдяки використанню нового типу модуляції буде в кілька разів вище, ніж досяжна в мережах 4G [10].

1.5 Обробка радіочастотного сигналу та можливість об'єднання бездротового та оптоволоконного зв'язку

Основні мережеві рішення, де застосовуються інтегровані технології волокна-ефіру, в основному складаються з трьох частин: 1) з'єднання центральних станцій і базових станцій через оптичне волокно; 2) в центральних станціях обробки інформації переважно використовуються оптико-електронні методи модуляції радіочастотних сигналів, після створення конвертованого радіочастотного сигналу на оптичному носії він передається на базову станцію по оптичних волокнах; 3) Потім сигнал передається користувачеві через радіоантену, де, знову ж таки, оптико-електронними методами оптичний сигнал перетворюється в електричний. Модуляція може здійснюватися безпосередньо за допомогою радіочастотних сигналів або сигналів проміжної частоти (IF). Спектр радіосигналів, які зараз випромінюють мережеві системи RoF, зазвичай дуже широкий, потенційно до кількох ГГц. А для перетворення радіосигналу в оптичний діапазон практично необмежений до 1 ТГц, така і схема модуляції. Але в електричній частині такої гібридної технології практична межа – до 160 ГГц. Бездротовий зв'язок в MMD і OD має величезний потенціал для використання в системах бездротового зв'язку. В даний час інтеграція бездротових технологій в міліметровому і оптичному діапазонах, оптоволоконних магістралях має ключове рішення для майбутніх систем зв'язку.

Оптоелектронна обробка радіочастотних (РЧ) сигналів використовується в широкому діапазоні застосувань завдяки своїй широкій смузі пропускання, високій загальній продуктивності, меншим втратам порівняно з електронними РЧ-технологіями, високому ступеню реконфігурації та універсальності пристроїв, а також, найважливіше, надзвичайно високому рівню електромагнітної стійкості. Основні додатки використання оптоелектронних (фотонних) технологій лежать у сфері радіолокації, зв'язку та зондування, поєднання цих областей є перспективою в телекомунікаціях майбутнього. За допомогою гібридних волоконно-повітряних систем оптико-електронних технологій перетворення інформаційних сигналів було отримано багато різних технічних рішень, таких як вдосконалені модулятори формату кодування, формувачі променя, процесори радіочастотних сигналів із перехресною фільтрацією, радіоканалізатори та аналізатори спектру та багато іншого. Формати високого порядку для модуляції радіочастотного сигналу в міліметровому та терагерцовому діапазонах були досягнуті за допомогою оптоелектронних модуляторів, і формат модуляції як оптичних, так і радіочастотних сигналів безпосередньо впливає на пропускну здатність, а також на спектральну ефективність телекомунікаційних систем. Тому використання гібридних волоконно-ефірних та оптоелектронних технологій є ключовим фактором у розробці передових систем зв'язку.

Також вважається, що рішення поєднання переваг наземних і неназемних телекомунікаційних систем, технологій FSO, високочастотних ММД і терагерцових діапазонів, волоконно-оптичних магістралей може реалізувати пропускну здатність таких інтегрованих мереж, притаманну волоконно-оптичним технологіям.

Мережева система волоконного ефіру передає дані по волоконно-оптичних кабелях за допомогою модуляції оптичної несучої з радіочастотним інформаційним сигналом. Модуляція може здійснюватися безпосередньо за

допомогою радіочастотних сигналів або за допомогою сигналів проміжної частоти (ПЧ). Спектр радіосигналів, який зараз поширюються мережевими системами RoF, дуже широкий, гігагерц, залежно від програми. Практично будь-який тип схеми модуляції радіосигналу теоретично може бути переданий у волоконно-оптичній частині волоконно-оптичної наземної системи.

Сучасні системи зв'язку в основному працюють в діапазоні частот 800 МГц ~ 30 ГГц. Таким чином, наявні ресурси спектру вже дуже обмежені, що серйозно ускладнює розвиток мобільного зв'язку. Якщо високочастотну частоту міліметрового діапазону можна використовувати як несучий сигнал, можна подолати перешкоду відсутності ресурсів спектру, а також стане можливим високошвидкісний бездротовий широкопasmовий доступ, що робить розвиток регіонального високочастотного спектру та супутні послуги та програми більш термінові.

Хвилі міліметрового діапазону відносяться до мікрохвиль з довжиною хвилі 1 мм ~ 10 мм, що відповідає діапазону частот 30 ~ 300 ГГц. Для сучасних технологій бездротового зв'язку діапазон частот до 270 ГГц є значним і цінним ресурсом. Найважливішим моментом є те, що сигнал mmWave 40-60 ГГц можна використовувати без дозволу на міжнародному рівні. Таким чином, останнім часом у світі велика увага приділяється дослідженню та застосуванню комунікаційних технологій на основі високочастотних міліметрових хвиль. Високочастотна система бездротового зв'язку міліметрового діапазону має такі переваги:

- mmWave має дуже високу частоту та широку смугу пропускання, що дозволяє передавати дані з високою смугою пропускання. Швидкість передачі даних може досягати кількох сотень Гбіт/с, аж до 1 ТБ/с.

- радіоантени системи бездротової базової станції, що використовує технологію несучої міліметрової хвилі, менші, що дуже корисно для встановлення, обслуговування та розширення функцій.

- спрямований пучок міліметрових хвиль має дуже високу спрямованість при поширенні в просторі, що підвищує завадостійкість і поширення сигналу та забезпечує інформаційну безпеку. Таким чином, розподіл ММД більш стабільний і надійний з високим коефіцієнтом безпеки.

Висновки

У першому розділі розглянено перспективи використання міліметрових хвиль для мережі п'ятого покоління. Зроблено огляд загальних характеристик та особливостей мережі 5G. Зазначено ряд специфічних вимог, які не можуть бути задоволені за допомогою існуючих мереж зв'язку.

Представлено аналіз розвитку мережі п'ятого покоління, а також аналіз технічних вимог та енергетичних параметрів для впровадження технології 5G. Проаналізовано обробку радіочастотного сигналу та можливість об'єднання бездротового та оптоволоконного зв'язку

Так як останнім часом у світі велика увага приділяється дослідженню та застосуванню комунікаційних технологій на основі високочастотних міліметрових хвиль, тому у даному розділі представлено переваги високочастотної система бездротового зв'язку міліметрового діапазону

2 МЕТОДИ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ

У бездротовому зв'язку дані передаються від одного пристрою до іншого через радіоресурси. Основними фізичними радіоресурсами є час та частота. Проблема множинного доступу (multiple access, MA) виникає, коли необхідно обслужити кілька користувачів, використовуючи ресурси з обмеженими ступенями свободи. Схема MA не може складатися лише з одного модуля. Натомість вона зазвичай включає кілька модулів обробки сигналів на фізичних каналах, таких як кодування, модуляція, попереднє кодування, картування ресурсів, управління потужністю і навіть форми сигналів. У комунікаціях типу «крапка-крапка» пропускна здатність одного наскрізного каналу максимальна. Підхід множинного доступу відрізняється від цього тим, деякі модулі можуть бути спроектовані спеціально для спільної роботи кількох користувачів або так, щоб максимізувати пропускну здатність системи в цілому. Це особливо актуально, коли кількість користувачів велика і доступні ступені свободи є спільними для всіх користувачів.

2.1 Огляд існуючих рішень

З погляду мультиплексування ресурсів методи MA діляться на дві категорії: ортогональний множинний доступ (orthogonal multiple access, OMA) і неортогональний множинний доступ (nonorthogonal multiple access, NOMA). Крім того, існують дві схеми, пов'язані з процедурами передачі з погляду планування ресурсів: передачі зі службовою інформацією (grant-based, GB) та передачі без службової інформації або безгрантової передачі (grant-free, GF). Ці методи MA та схеми передачі привернули увагу дослідників та розробників стандартів 5G [1]. Більш того, обидва методи MA застосовні як до передач типу GB, так і GF.

2.1.1 Ортогональний множинний доступ

У попередніх поколіннях ортогональний доступ був домінуючою схемою. "Ортогональний" вказує, що існує незалежний ступінь свободи, що належить кожному користувачеві, принаймні в одній з областей, включаючи частоту, час, код та простір. Це означало, що на передачу користувача не впливають інші користувачі одночасно. Виходячи з ресурсів, які поділяють, щоб розрізнити безліч користувачів, можна виділити наступні схеми ОМА: множинний доступ із частотним поділом (FDMA), множинний доступ із тимчасовим поділом (TDMA), множинний доступ із кодовим поділом (CDMA), множинний доступ із просторовим поділом каналів (SDMA) та множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів (OFDMA) [2].

FDMA: для підключення декількох користувачів до мережі система FDMA виділяє неперекриваються смуги частот кожному користувачеві або потоку даних як виділені канали. Щоб повністю усунути перешкоди сусіднім користувачам, слід використовувати захисні смуги. Це знижує ефективність використання спектра системи загалом. Таким чином, FDMA недостатньо ефективний і не дозволяє величезній кількості користувачів отримати доступ до мережі.

TDMA: система TDMA ділить тимчасову область на безліч тимчасових інтервалів (тайм-слотів). Передавач використовує ці слоти для передачі різних сигналів різним користувачам. Біти корисного навантаження кожного користувача поділяються за часом і відправляються пакетами, коли доступні відповідні часові інтервали. Таким чином, у мережі можна розмістити лише обмежену кількість користувачів або потоків даних.

CDMA: у системі CDMA тимчасові та частотні ресурси можуть одночасно використовуватися кількома користувачами або потоками даних. Різні користувачі або потоки даних розрізняються ортогональні або напівортогональні (також відомі як майже ортогональні) кодами розширення. Дуже довгі послідовності необхідні досягнення хорошого виграшу при

обробці, а ортогональність потрібна розміщення великої кількості користувачів. Ці вимоги роблять його недостатньо гнучким для роботи з великою смугою пропускання та масивним MIMO.

OFDMA: цей стандарт розроблено на основі сигналів OFDM. Він забезпечує жорстку та ортогональну упаковку піднесучих у частотній області з рознесенням піднесучих, зворотним тривалості символу. У системі OFDMA тимчасова та частотна площина поділяються на двовимірний растр. Мінімальна одиниця растру називається ресурсним елементом (resource element, RE), що складається з однієї піднесучої (або тону) в частотній області та одного символу в часовій області. Кожен RE передає модульований символ, що належить одному користувачеві або потоку даних. Таким чином досягається максимальна гнучкість ресурсів, які можна легко поєднувати з такими функціями, як масивний MIMO. Однак стандарт пред'являє високі вимоги до тимчасової та частотної синхронізації, обслуговування якої може бути занадто дорогим для дуже дешевих та малопотужних пристроїв.

SDMA: з розвитком сучасних технологій MIMO з'явився стандарт SDMA – варіант для використання з масивними антенними ґратами. У системі SDMA аналоговий чи цифровий формувач променя може створювати кілька сфокусованих просторових променів для виділених запланованих користувачів. У поєднанні з ідеальною інформацією про стан каналу промені для запланованих користувачів можуть бути майже ортогональними один одному, як це потрібно для мінімізації перешкод між користувачами. Однак ортогональність SDMA багато в чому залежить від точності інформації про канал. На жаль, її стає важко відслідковувати через зростаючу кількість користувачів і спорадичного трафіку.

Хоча, як показано вище, для покращення пропускної спроможності системи, зручності користувачів та збільшення кількості підключень були розроблені різні схеми на основі OMA, все ще залишаються обмеження та прогалини, які необхідно усунути, щоб задовольнити різноманітні та дуже жорсткі вимоги до послуг у 5G. Зокрема, можна виділити такі проблеми:

- *обмеження кількості користувачів, що одночасно обслуговуються:* кількість користувачів або потоків даних строго обмежена кількістю ортогональних каналів у системі ОМА;

- *високі накладні витрати на службові дані та ресурси для гарантії ортогональності:* ортогональність у системі ОМА зазвичай гарантується наданням ресурсів, що надсилаються базовими станціями користувачам до того, як може розпочатися будь-яка передача в будь-якому напрямку, включаючи висхідні, низхідні або прямі лінії зв'язку. Коли кількість користувачів збільшується, накладні витрати на обробку сигналів збільшуються пропорційно, зменшуючи пропускну здатність системи загалом. Більше того, для певних послуг IoT динамічна обробка грантів може або вводити неприпустиму затримку, або займати більше 50% корисного навантаження під час кожної передачі. Ні той, ні інший випадки є неприйнятними з точки зору ефективності використання спектра та енергоефективності. Ортогональність може бути гарантована за допомогою попередньо налаштованих ресурсів, але накладні витрати на ресурси все одно залишаються більшими, особливо коли трафік поводить непередбачувано та спорадично;

- *сильна залежність від інформації про канал:* у реальних сценаріях розгортання продуктивність розрахованої на багато користувачів системи MIMO зі зворотним зв'язком (MU-MIMO) і координованої багатоточкової передачі/прийому (coordinated multipoint, CoMP) все ще далека від теоретичних кордонів, особливо для користувачів високошвидкісного мобільного зв'язку. Основна причина цього – їхня сильна залежність від точного знання інформації про канал для попереднього кодування зі зворотним зв'язком. Однак, якщо трапляються порушення мережі, отримання точної інформації неможливе, і якість роботи систем MU-MIMO або CoMP із зворотним зв'язком відповідно погіршується. Це може статися у випадках старіння каналу, затримки зворотного зв'язку або виражених міжсотових перешкод, які зазвичай трапляються на практиці.

2.1.2 Неортогональний множинний доступ

Щоб подолати обмеження ОМА, було розроблено технологію неортогонального множинного доступу (NOMA), яка терпима до конфлікту ресурсів в ортогональних каналах. З точки зору теорії мережевої інформації [3, 4] як для висхідного каналу МА [5], так і для низхідного ширококомовного каналу [6] сукупна пропускна здатність для декількох користувачів NOMA може бути більшою порівняно з паралельною передачею для одного і того ж набору користувачів на ортогонально розділених ресурсах. Доведено, що такі методи, як послідовне придушення перешкод [5] та «кодування на брудному папері» (попереднє кодування Коста) [6] на базових станціях, дозволяють досягти оптимальних значень пропускної спроможності для МА каналу і каналу ВС відповідно. Більш того, NOMA може підтримувати подальшу суперпозицію сигналів в ортогональному підпросторі під час передачі MU-MIMO. Одне недавнє дослідження [7] показало, що, інтегруючи кодову частину схеми NOMA у передачу MU-MIMO висхідної лінії зв'язку, можна отримати додатковий виграш у пропускній здатності навіть для системи з 64 приймальними антенами.

У багатьох сценаріях застосування важлива не пропускна здатність для одного користувача, а кількість користувачів, які можуть бути обслужені з гарантованою цільовою швидкістю. У цьому сенсі NOMA можна розглядати як механізм, який обмінює пікову швидкість передачі даних однієї сполуки на більшу кількість сполук [8]. Це досягається за рахунок використання приймачів NOMA для придушення міжкористувацьких перешкод. Це надзвичайно корисно в ІоЕ, де є багато пристроїв, але при цьому кожен пристрій не висуває дуже високих вимог до швидкості передачі даних. У поєднанні з MU-MIMO NOMA більше сприяє збільшенню кількості користувачів, що обслуговуються, ніж просте нарощування кількості передаючих або приймальних антен.

Таким чином, при хорошій конструкції приймача NOMA може забезпечити наступні невід'ємні переваги перед ОМА:

- *збільшення пропускної спроможності розрахованої на багато користувачів системи:* як доведено теорією мережевої інформації, NOMA додатково збільшує пропускну спроможність системи, не використовуючи додаткові спектральні ресурси або антени;

- *підтримка перевантаженої передачі:* NOMA додатково збільшує загальну кількість підключень за рахунок введення допустимої колізії символів у ортогональних каналах. У разі система вважається перевантаженою. Завдяки відповідній схемі розрахованого на багато користувачів детектування (MUD) і кодовим книгам NOMA, які можуть включати багатовимірні комбінації [9, 10], сигнатури розбіжності [11] і шаблони конфліктів ресурсів [12, 13], може бути досягнутий коефіцієнт перевантаження вище 300%. Тут коефіцієнт перевантаження визначається як співвідношення між кількістю користувачів, яких одночасно здійснюється доступ, і кількістю ортогональних RE;

- *забезпечення надійної безгрантової передачі:* як буде описано нижче, щоб уникнути великих накладних витрат на сигнальний механізм і зменшити затримку встановлення зв'язку, заснованої на використанні службової інформації, було запропоновано безгрантову передачу, особливо придатну для послуг з невеликими розмірами пакетів та спорадичним трафіком. Маючи стійкість до конфліктів символів, безгрантовий механізм з підтримкою NOMA може реалізувати більш агресивне спільне використання ресурсів між великою кількістю користувачів, зберігаючи при цьому той самий рівень цільової надійності;

- *забезпечення надійного MU-MIMO без зворотного зв'язку:* щоб подолати вузьке місце, пов'язане з отриманням інформації про канал у реальному часі при масивних передачах у системі MIMO з петлею зворотного зв'язку, NOMA надає альтернативу MU-MIMO без зворотного зв'язку. Оскільки цей механізм не покладається на точну інформацію про канал, він

може бути стійкішим до змін мережі, таких як старіння каналу та мобільність користувачів. Цей механізм без зворотного зв'язку може бути додатково розширений для випадків з кількома базовими станціями, в яких замість збору точної інформації про канал від цільових користувачів та подальшого відправлення цієї інформації на кожну базову станцію для спільного попереднього кодування кожна з партнерських базових станцій може вибрати неортогональний код та спільно передавати потоки даних без обміну інформацією про канал з користувачами чи іншими базовими станціями. Це особливо корисно, коли точна інформація недоступна або її отримання коштує занадто дорого;

- *Забезпечення гнучкого мультиплексування послуг:* традиційним підходом ОМА для ефективного обслуговування диверсифікованого трафіку є динамічне планування ресурсів. Цей підхід вимагає додаткових службових даних і може бути недостатньо швидким для відповідності вимогам до мінімальної затримки у деяких сценаріях. Завдяки суперпозиційній природі НОМА невеликі пакети з малою затримкою можуть бути накладені поверх великих пакетів для спільної передачі, тим самим покращуючи затримку та одночасно скорочуючи накладні витрати.

2.1.3 Безгрантовий множинний доступ

Базові станції виконують передачу службової інформації (grant broadcast, GB) через ресурси, що динамічно плануються. На відміну від GB-передачі, GF-передача виконується через попередньо налаштовані або напівстатично налаштовані ресурси для користувачів висхідного або низхідного каналу зв'язку. Ресурси, налаштовані таким чином, можуть спільно використовуватися більш ніж одним користувачем GF, що може призвести до конфліктів передачі між користувачами GF, і тому GF-передача також називається конкурентною передачею. Завдяки напівстатичному механізму конфігурації схема GF-передачі, яку можна охарактеризувати фразою «прийшов і пішов», підходить для послуг та застосувань, які потребують малої

затримки, таких як трафік URLLC. Більш того, схема GF-передачі має особливе значення для підтримки аперіодичного та чутливого до затримки трафіку, час прибуття якого непередбачувано, але при цьому трафік має бути переданий відразу після його прибуття.

Схема GF-передачі також може значно заощадити потужність і знизити накладні витрати на сигналізацію передачі по висхідній лінії зв'язку завдяки тому факту, що їй не потрібно відправляти запит планування на базову станцію після прибуття трафіку і що вона може уникнути процесу детектування в отриманні контрольної інформації. Економія енергії внаслідок запобігання квітування запитів планування та детектування керуючих сигналів має першорядне значення для чутливих до потужності пристроїв, таких як інтелектуальні датчики (які потребують тривалого терміну служби батареї).

Однак через те, що схема заснована на конкуренції, коли кілька користувачів можуть спільно використовувати тимчасові та частотні ресурси, безгрантова передача по висхідному каналу може викликати певні конфлікти. Це, у свою чергу, може призвести до неминучих повторних передач та побоювань щодо надійності. На щастя, колізійний характер GF передачі можна подолати за допомогою переваг NOMA. За допомогою комбінації GF-передачі (висхідний канал зв'язку) і NOMA кожному користувачеві GF може бути напівстатично призначена ретельно розроблена або випадково обрана сигнатура NOMA попередньо сконфігурованого пулу сигнатур. Міжперешкодні перешкоди, викликані колізіями передачі, потім можуть бути усунені вдосконаленим приймачем NOMA, який має можливість з високою надійністю розділяти сигнали, що перекриваються. В результаті схема GF плюс NOMA є ключовою технологією, що забезпечує надійну, швидку та ефективну (висхідну) передачу даних у бездротовій мережі.

Як обговорювалося вище, схема GF з підтримкою NOMA здатна зменшити затримку доступу, обсяг службових даних управління сигнальним механізмом і споживання енергії пристроями, особливо при передачі малих

пакетів і чутливих до затримки передач для економічних та енергоефективних пристроїв. Однак у цієї схеми все ще є деякі проблеми, які необхідно вирішити, такі як пошук оптимальної форми пілот-сигналу і дозвіл колізій в NOMA, оптимальний формат зворотного зв'язку GF HARQ, компроміси між зворотним зв'язком GF і повторною передачею, а також компроміси між швидкими швидкостями, довжиною пакета та надійністю (з точки зору теорії інформації). Останнім часом вивчення цих тем привертає увагу дослідників, і академічний огляд цих тем можна знайти в [1]. Огляд [1] також охоплює ранню роботу з вирішення проблеми доставки коротких пакетів з погляду теорії інформації, а також недавню роботу з оцінки характеристик GF схеми з NOMA.

2.2 Множинний доступ та надмасивне підключення

Надмасивне підключення – це незамінна здатність, необхідна для системи 5G у багатьох застосуваннях, особливо передачі коротких пакетів зі спорадичними моделями трафіку. Щоб забезпечити надмасивне підключення в рамках обмежених радіоресурсів, потрібний безгрантовий доступ за допомогою NOMA. Однак, щоб реалізувати надмасивне підключення, нам необхідно вирішити такі проблеми, властиві поточним застосуванням GF-передачі та NOMA:

- *колізія даних*: через обмежені загальні радіоресурси та відсутність координації між передачами при масовому підключенні неминуха колізія даних. Щоб розмістити більшу кількість одночасно активних пристроїв, необхідно провести дослідження щодо покращення схем передачі NOMA та алгоритмів MUD;

- *колізія пілотних сигналів*: хоча проблему колізії даних можна зменшити за допомогою передових методів NOMA, колізія пілотних сигналів залишається невирішеною проблемою для множинного безгрантового доступу. Тому подальшого вивчення вимагають схеми розширення пілот-

сигналу чи навіть некогерентні схеми без пілот-сигналу. У деяких випадках схеми необхідно розглядати в рамках NOMA, щоб разом вирішувати проблеми колізії пілот-сигналів та проблеми колізії даних, які є двома критичними проблемами для надмасивного підключення;

- *надмасивні антени*: проблему надмасивного підключення у конфігураціях з масивними антенами на стороні базової станції не можна розглядати як просто збільшену версію вихідної проблеми. Вона може бути особливо актуальною, коли кількість антен дуже велика, антени більше не розміщені разом або використовуються нові компоненти, такі як RIS. Деякі особливі властивості каналу у разі застосування надмасивних антен можуть бути застосовані для вирішення проблем колізії як даних, так і пілот-сигналу.

2.3 Множинний доступ та надійне формування променя

У діапазоні 5G міліметрових хвиль і (суб)ТГц повинні використовуватися в поєднанні з масивним MIMO, особливо в застосуваннях з великою пропускну здатністю. Зі збільшенням кількості антенних елементів та переходом у більш високочастотний діапазон сигнальні промені MIMO стануть надзвичайно вузькими. Отже, буде складно генерувати кілька дуже вузьких променів, які точно спрямовані на кількох користувачів одночасно, тому що в багатьох сценаріях буде важко отримати точну інформацію про стан каналу. У таких випадках для надійного формування променя можуть бути розроблені покращені схеми NOMA спільно з розрахованим на багато користувачів попереднім кодуванням. Маючи можливості NOMA, MU-MIMO може використовувати модифіковану схему попереднього кодування. Замість формування дуже вузьких і точних променів, націлених кожного користувача окремо, прекодер MU-MIMO тепер може генерувати ширші промені для націлювання на групу користувачів, які додатково мультиплекуються за допомогою NOMA. Збільшення ширини променя робить його більш стійким до змін параметрів каналу, наприклад,

викликаним мобільністю користувача або затримкою вимірювання та зворотного зв'язку. Міжкористувацькі перешкоди всередині групи додатково придушуватиметься приймачем NOMA за допомогою переданих сигнатур NOMA. Аналогічні ідеї можуть бути додатково застосовані при спільній передачі з кількома базовими станціями.

Висновки

У другому розділі розглянуто основні принципи та терміни, що стосуються методів множинного доступу, методи тимчасового та частотного поділу користувачів, модуляцію OFDM та розроблений на його основі метод множинного доступу OFDMA, різні перспективні модифікації технології OFDM, засновані на фільтрації сигналу, мультиплексування з неортогональним частотним поділом (N-OFDM, SEFDM) та модуляцію в ортогональному частотно-часовому просторі (OTFS). Також відзначено переваги, недоліки та галузі застосування цих технологій.

3 ПЕРЕДОВІ АНТЕННІ СИСТЕМИ ДЛЯ РОЗГОРТАННЯ МЕРЕЖІ 5G

Системи MIMO вимагають поєднання розширення антени та складних алгоритмів. Вона багатогранна, вже давно використовується в бездротовому зв'язку – як для мобільних пристроїв, так і для мереж зазвичай є кілька антен для покращення зв'язку та кращої швидкості та зручності для користувачів. Алгоритми MIMO вступають у дію, щоб контролювати, як дані відображаються в антенах і де фокусувати енергію в просторі. І мережеві, і мобільні пристрої повинні мати тісну координацію між собою, щоб MIMO працювало.

Тепер, коли розробляються нові мережі 5G NR, MIMO стає «масовим» і має вирішальне значення для розгортання 5G NR.

Масив MIMO – який є розширенням MIMO – виходить за межі застарілих систем, додаючи набагато більшу кількість антен на базовій станції. Величезна кількість антен допомагає сфокусувати енергію, що суттєво покращує пропускну здатність і ефективність. Поряд із збільшенням кількості антен, як мережа, так і мобільні пристрої реалізують більш складні конструкції для координації операцій MIMO. Все це спрямовано на досягнення покращення продуктивності, яке необхідне для підтримки 5G, якого споживачі очікують у цю нову еру.

Демістифікація масиву технології MIMO. Розглянемо будову блоків систем MIMO. Вони використовують три ключові концепції, а саме просторове рознесення, просторове мультиплексування та формування променя.

3.1 Просторове рознесення та просторове мультиплексування

Просторове рознесення є однією з основних переваг технології MIMO. Коротше кажучи, різноманітність спрямована на підвищення надійності

системи шляхом надсилання одних і тих самих даних різними шляхами розповсюдження або просторовими шляхами.

Просторове рознесення перетворюється на більш складну концепцію, яка є «просторовим мультиплексуванням». Тепер для покращення продуктивності використовуються не тільки різноманітні можливості радіоканалу, але й кілька повідомлень можна передавати одночасно, не заважаючи одне одному, оскільки вони розділені у просторі.

Щоб краще уявити концепцію просторового мультиплексування, можна уявити конвеєр, по якому дані передаються між базовою станцією та телефоном у мобільній мережі. Встановивши більше антен з обох боків із належним просторовим розділенням, можна створити кілька віртуальних трубопроводів у просторі між телефоном і базовою станцією. Це створює кілька шляхів для передачі більшої кількості даних між базовою станцією та мобільним.

За своєю природою це рішення дуже динамічне. З безперервним рухом мобільного користувача та змінами в навколишньому середовищі мобільний телефон і мережа потребують більш розширених можливостей для безперервної координації зв'язку та керування передачею даних.

Формування променя є ще одним ключовим методом бездротового зв'язку, який використовує передові технології антени як на мобільних пристроях, так і на базових станціях мережі, щоб сфокусувати бездротовий сигнал у певному напрямку, а не транслювати на широку область.

З величезною кількістю антенних елементів у масиві системи MIMO формування променя стає «3D Beamforming». 3D Beamforming створює горизонтальні та вертикальні промені до користувачів, збільшуючи швидкість передачі даних (і пропускну здатність) для всіх користувачів – навіть для тих, хто знаходиться на верхніх поверхах висотних будинків (рис. 3.1).

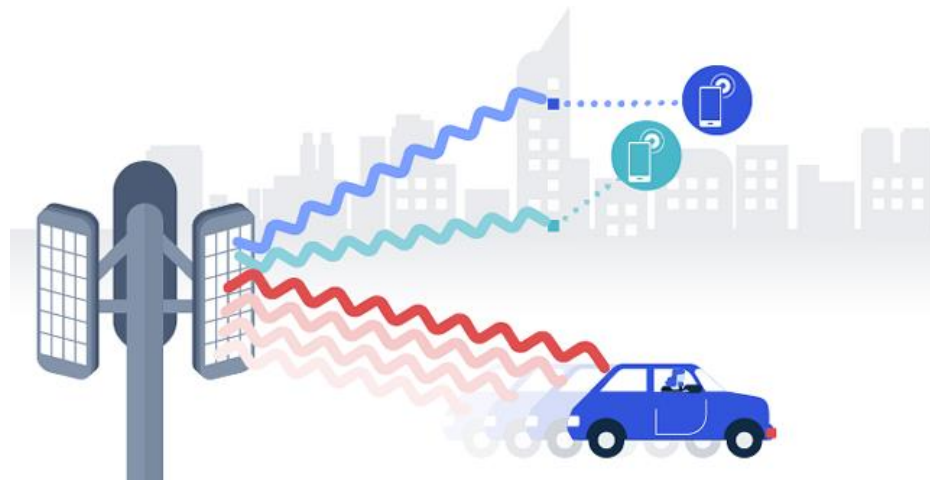


Рисунок 3.1 – Формування горизонтальних та вертикальних променів

Зворотний зв'язок мобільного зв'язку з мережею дозволяє мережевому променю знаходити будь-яку точку в просторі, тому мобільний користувач завжди може отримувати сфокусований промінь на своїх пристроях, коли він рухається вулицею або між різними поверхами будівлі. Також наявність таких вузьких прямих променів зменшує інтерференцію між променями, спрямованими в різних напрямках.

3.2 Multi-користувацьке MIMO

Технологія MIMO також дозволяє кільком користувачам одночасно використовувати ті самі мережеві ресурси. Multi-User MIMO або «MU-MIMO» дозволяє повідомленням для різних користувачів безпечно переміщатися по однакових каналах даних, а потім сортуватися за окремими користувачами, коли дані надходять на їхні мобільні пристрої. Обслуговування кількох користувачів однією передачею збільшує пропускну здатність і дозволяє краще використовувати ресурси. Це доповнює можливість завантажувати або транслювати з покращеним досвідом для користувача навіть у людному місці.

Така спільна передача даних означає швидшу та ефективнішу систему для всіх користувачів (рис. 3.2). Це доповнює можливість завантажувати або транслювати з покращеним досвідом для користувача, навіть у людних місцях.

Крім того, мережі можуть динамічно перемикатися між обслуговуванням одного або кількох користувачів. Коли обслуговується один користувач, зазвичай промінь є більш прямим, а потужність більш сфокусованою. Однак у випадку кількох користувачів промені, як правило, ширші, оскільки користувачі можуть розбігатися в різних напрямках.

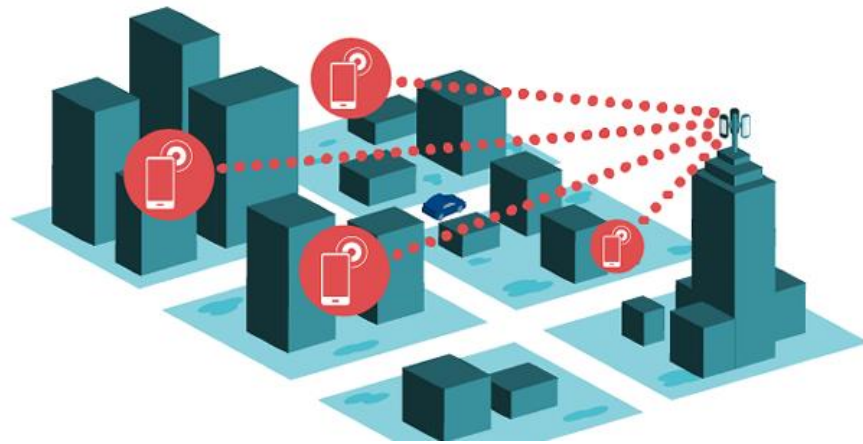


Рисунок 3.2 – Multi-користувацьке MIMO

3.3 Переваги масивного MIMO

Масив MIMO є ключовим фактором надзвичайно високої швидкості передачі даних 5G і обіцяє підняти потенціал 5G на новий рівень. Основні переваги масивного MIMO для мережі та кінцевих користувачів можна підсумувати так:

Збільшена ємність мережі – ємність мережі визначається як загальний обсяг даних, які можуть бути надані користувачеві, і максимальна кількість користувачів, які можуть бути обслуговані з певним рівнем очікуваного

обслуговування. Масив MIMO сприяє збільшенню пропускну́ї здатності, перш за все, дозволяючи розгортати 5G NR у вищому діапазоні частот нижче 6 ГГц (наприклад, 3,5 ГГц); і по-друге, використовуючи MU-MIMO, де кілька користувачів обслуговуються з однаковими часовими та частотними ресурсами.

Покращене покриття – завдяки масиву MIMO користувачі насолоджуються більш рівномірною роботою по всій мережі, навіть на межі стільника, тому користувачі можуть розраховувати на високу швидкість передачі даних майже всюди. Крім того, 3D-формування променя забезпечує динамічне покриття, необхідне для рухомих користувачів (наприклад, користувачів, які подорожують в автомобілях або підключених автомобілях) і регулює покриття відповідно до місця розташування користувача, навіть у місцях із відносно слабким покриттям мережі.

Взаємодія з користувачем. Зрештою, дві вищевказані переваги забезпечують кращий загальний досвід роботи з користувачем — користувачі можуть передавати великі файли даних або завантажувати фільми або використовувати програми.

Як згадувалося раніше, MIMO використовується в бездротовому зв'язку протягом багатьох років. Але тепер, у контексті 5G NR, масив MIMO радикально змінює те, як і коли ми вирішуємо використовувати наші мобільні пристрої. Нам завантаження чи передачі великих файлів. Користувацький досвід незабаром зробить величезний стрибок вперед.

Масив MIMO є лише одним із прикладів багатьох проривних винаходів, які створили в результаті десятиліть досліджень і розробок, щоб розблокувати 5G для мобільної індустрії та за її межами та змінити спосіб обчислення, підключення та спілкування.

3.4 Ультрамасивний MIMO

Бездротовий зв'язок з кількома передавальними антенами, що перевершує можливості фазованих антенних решіток [1], став популярною темою досліджень наприкінці ХХ століття. Протягом цього періоду з'явилося безліч нових схем передачі та прийому, таких як просторово-часові блокові коди (space-time block codes, STBC) [2], код Аламоуті [3], багатопаровий простір-час Bell Laboratories (BLAST) [4] та сферичне декодування [5]. Це значно покращило пропускну здатність каналу та надійність кількох передаючих антен. Незабаром ці нові технології були впроваджені у 3GPP. Його перша версія (1G LTE) підтримувала до чотирьох портів передавальної антени на низхідному каналі, які могли бути ідентифіковані користувачами за допомогою опорних стільникових сигналів (cell reference signal, CRS). Щоб задовольнити попит, що постійно зростає, на щільність користувачів, пропускну здатність і надійність з'єднання, разом з новими версіями LTE поступово покращувалася і підтримка MIMO. Пізніше, коли вийшов новий радіоінтерфейс, масивний MIMO спочатку підтримувався через архітектуру MIMO на основі променів, особливо в діапазонах TDD, які полегшили масове розгортання MIMO (через простіше отримання інформації про канал). Для досягнення строгих KPI мережі 5G повинні піддаватися ущільненню, що дозволяє розміщувати ширшу смугу пропускання у вузьких діапазонах та використовувати MIMO ще вищого порядку. Це призведе до появи розподіленого радіодоступу в мережу 5G з щільно розміщеними віддаленими радіоголовками (RH), ELAA і великою кількістю антенних панелей. До того ж кожна антенна панель матиме більше антенних елементів у міліметрових діапазонах, конструкція яких згодом буде модифікована для ТГц-діапазону, щоб використовувати набагато ширший спектр. Крім величезної кількості

частотних ресурсів, терагерцевий MIMO також сприятиме досягненню інших ключових показників ефективності 5G, таких як локалізація та сканування.

3.4.1 Огляд існуючих рішень

Незважаючи на те, що у NR був досягнутий значний прогрес у плані підвищення надійності та пропускної спроможності каналів MIMO, подальше вдосконалення для створення ще більш швидких та надійних каналів MIMO є бажаним та досяжним.

В даний час NR має широку підтримку MIMO як низько-, так і в середньочастотному діапазоні нижче 7,125 ГГц, відомому як частотний діапазон 1 (FR1) [6], а також у діапазонах високих частот від 24,250 до 52,6 ГГц (відомих як FR2) [7]. Однак подальша підтримка MIMO в епоху 6G пов'язана з низкою проблем. Наприклад, у міру збільшення кількості антенних елементів, розгорнутих у кожному вузлі, та променів передачі/прийому також збільшуються витрати вимірювання радіосигналу, управління променем та отримання інформації про стан каналу.

3.4.2 Технології MIMO для FR1

Технологія MIMO була ключовим технічним компонентом систем бездротового зв'язку з моменту появи 4G, тобто стандартів довгострокового розвитку (LTE) та вдосконаленого LTE (LTE-A). На ранніх етапах стандартизація LTE проводилася з припущення, що базові станції мають лише кілька антенних портів, зіставлених з кількома секторними антенами, де антенні елементи використовувалися на формування діаграми спрямованості та її електронного нахилу. Передача по кількох антенах в LTE/LTE-A використовувала різні режими передачі для отримання покращеного рознесення, мультиплексування та масивності, причому кожен режим оптимізований для різного набору конфігурацій системи, таких як антенні

порти, FDD, TDD, частота, мобільність і т. д. Велика кількість режимів передачі ускладнювало реалізацію та обмежувало досяжний виграш у нових режимах, особливо якщо взяти до уваги обов'язкову зворотну сумісність з більш ранніми пристроями з обмеженими можливостями. Система 5G NR поєднала всі режими передачі в єдину схему передачі з просторовим мультиплексуванням. У міру розвитку LTE до R13 та R14 масова технологія MIMO вже була досить зрілою для розгортання у комерційних мережах. Таким чином, починаючи з початкових етапів стандартизації 5G NR технологія масивного MIMO була основним фактором при проектуванні системи NR, яка включає кілька активних антенних решіток, що містять десятки або сотні антенних елементів на базових станціях. Ці решітки здатні формувати промені, що розрізняються по пілот-сигналу, для сотень антенних портів, а кількість антенних елементів набагато більше, ніж кількість використовуваних радіочастотних кіл.

Отримання інформації про стан каналу за передавача завжди було ключовим компонентом MIMO. Базова схема вимірювання каналу в системах LTE/LTE-A та 5G NR зазвичай потребує певних опорних сигналів. Наприклад, це може бути опорний сигнал стану каналу (CSI-RS) у низхідній лінії зв'язку або зондуєчий опорний сигнал (SRS) у висхідній лінії зв'язку, на основі якого приймач може вимірювати та оцінювати характеристики каналу, що цікавить. Наприклад, станція 5G зазвичай передає користувачеві CSI-RS, який потім виконує вимірювання каналу, квантування та дає зворотний зв'язок. Схема опорного сигналу NR дуже гнучка і може бути підлаштована під кожного користувача, включаючи періодичність, час, частоту і просторове дозвіл, щоб оптимізувати підтримку різних сценаріїв використання, таких як eMBB, URLLC і mMTC.

Оскільки стільникові мережі стають все більш щільними, взаємні перешкоди мережі стають важливим фактором, що впливає на характеристики мережі. Як наслідок, вимірювання взаємних перешкод стало важливим аспектом отримання інформації про стан каналу. Як правило, gNB налаштовує

пристрій для виконання вимірювання взаємних перешкод на основі певних припущень. У міру збільшення складності мережі необхідно шукати ефективніші схеми обмеження перешкод, що виходять за рамки існуючих рішень.

3.4.3 Технології MIMO для FR2

NR підтримується зв'язок через FR2 (від 24,25 до 52,6 ГГц). 3GPP планує розширити підтримку частотних діапазонів до 71 ГГц [9] та покращити технології передачі сигналів для FR2. На відміну від зв'язку через FR1 (0,41-7,125 ГГц), який може працювати з MIMO як використовуючи промені, так і без них, в діапазоні FR2 зв'язок відбувається тільки з використанням променів та масивів антенних елементів. Це наслідок необхідності боротьби з втратами на трасі та малої апертури антени через невелику довжину хвилі. Такий масивний MIMO використовує вузькі промені, які займають лише найбільш значущий шлях (або шляхи) бездротового каналу. Отже, функція управління променем NR призначена для формування та утримання відповідної пари променів; зокрема, це промінь передавача та відповідний промінь приймача, які при поєднанні забезпечують хорошу якість зв'язку. В цілому функція управління променем включає різні компоненти: початкове формування променя, розгортку/підстроювання і відстеження променя, вказівка променя і відновлення після втрати променя.

У променевій системі MIMO передача даних, опорні сигнали вимірювання каналу, фізичні канали управління і канали синхронізації - всі вони формуються за рахунок діаграми спрямованості, що настроюється. Для розширення охоплення даних та управління як у висхідному, так і в низхідному напрямках використовуються ієрархічний пошук променя, налаштування форми та відновлення після збою через дедалі вузьчі промені. Сторони, зайняті у формуванні каналу зв'язку, не повідомляють одна одній форму та напрямок променів у явному вигляді. Промені неявно

ідентифікуються за відповідними опорними сигналами. Пристрій налаштований на постійний моніторинг кількох променів. Потім воно може вибрати один або кілька доступних променів і одразу повідомити про відмову каналу, якщо він повинен бути виявлений через канал із довільним доступом (random-access channel, RACH).

Висновки

У третьому розділі проаналізовано перспективні напрямки розвитку мереж безпроводового зв'язку. Розглянуто передові антенні системи для розгортання мережі 5G.

Розглянено будову блоків систем MIMO, які використовують три ключові концепції, а саме просторове рознесення, просторове мультиплексування та формування променя.

Якщо слідувати описаній в даному розділі процедурі керування променем, то в міру просування 5G до ще більш високих смуг міліметрового діапазону і збільшення кількості антенних елементів і променів або на стороні передавача, або на стороні приймача накладні витрати на вимірювання та зворотний зв'язок також збільшуються.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ОРТОГОНАЛЬНОЇ ПОДВІЙНОЇ ПОЛЯРИЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ МІМО

У [11–14] для використання в мобільних терміналах запропоновано неплоскі антенні решітки з вузькими смугами пропускання імпедансу (< 200 МГц). Однак, конфігурація використовуваних елементів не є плоскою, реалізація цього типу антен є серйозною проблемою. Друковані антени є більш доцільними через їх здатність легко інтегруватися в портативні пристрої. У [15–18] представлені конструкції МІМО з різними поляризованими випромінювачами для мобільних телефонів. Однак їх окремі елементи займають величезні простори, а також забезпечують вузьку смугу пропускання. Інші конструкції антен МІМО для додатків на смартфонах запропоновано в [19–22]. Ці антени мають дуже вузький діапазон і не охоплюють >100 МГц. Конструкція багатодіапазонної антени МІМО для програм 4G/5G представлена в [23]. Однак він містить лише чотири радіатори, що робить його непридатним для масового зв'язку МІМО. Він також займає великий простір на платі смартфона. У цьому дослідженні представлено конструкцію антени смартфона МІМО з компактними випромінювальними елементами, високою ефективністю та широкою смугою пропускання для додатків 5G 3,6 ГГц. Частота 3,6 ГГц є однією із смуг-кандидатів для комерційних стільникових мереж 5G під 6 ГГц. Чотири випромінювальні елементи антени з подвійним живленням/різною поляризацією з круглим кільцем/щілиною розміщені в різних кутах плати смартфона для демонстрації ортогональної поляризації з діаграмою спрямованості та різноманіттям поляризації. В результаті антена МІМО забезпечує не тільки повне покриття випромінюванням, але й поляризаційне різноманіття для кожної сторони друкованої плати [25].

Конфігурація антенного елемента складається з компактного круглокілецевого щілинного випромінювача з парою мікросмужкових

живильних ліній. Щоб зменшити характеристику взаємного зв'язку портів, під кожною мікросмужковою лінією живлення була вирізана прямокутна щілина [26]. Вона забезпечує досить хорошу смугу пропускання імпедансу (в межах 600 МГц для $S_{11} < -10$ дБ) і низький взаємний зв'язок, кращий за -15 дБ. На відміну від представлених конструкцій антен МІМО [11–22], дана конструкція демонструє ширшу смугу пропускання імпедансу та нижчу функцію коефіцієнта кореляції огинаючої. Висока ізоляція (18 дБ), висока ефективність (60–80%), широка смуга пропускання (600 МГц) і властивості подвійної поляризації були досягнуті для запропонованої конструкції. Крім того, розрахований загальний коефіцієнт активного відбиття (TARC) і властивості коефіцієнта кореляції огинаючої конструкції МІМО, як є дуже низькими ($<0,001$ і -20 дБ) по всій смузі (особливо на резонансній частоті 3,6 ГГц), що підтверджує здатність представленої системи антени смартфона для прийому/передачі рознесеного прийому/передачі в каналах МІМО. Крім того, запропоновано нову техніку живлення мікросмужкової лінії для створення подвійної та багатосмугової функції для випромінювачів із подвійною поляризацією круглого кільця. Більше того, для підтримки мобільних терміналів 5G міліметрового діапазону (мм-хвиль) пропонується компактна конструкція кінцевої матриці з широкою смугою пропускання, яку можна легко інтегрувати на антенну плату смартфона 5G. Для дослідження характеристик МІМО-антени, а також для пошуку оптимальної структури антени було використано програмне забезпечення CST Studio [27]. Фундаментальні характеристики випромінювання антени різної поляризації та її конструкція МІМО були досліджені нижче.

4.1 Одноелементна/двополярна антена

Конфігурація розробленої подвійної поляризованої круглої кільцевої антени проілюстрована на рис. 4.1. Вона розроблена на діелектрику FR-4 діаметром 1,6 мм ($\epsilon = 4,4$ і $\delta = 0,025$) для роботи на частоті 3,6 ГГц.

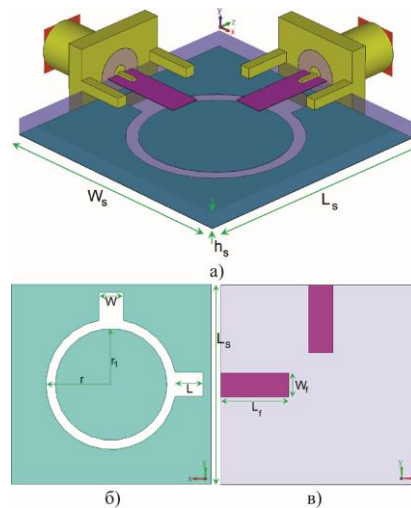


Рисунок 4.1 – Геометрія одноелементної антени
а) – прозорий вигляд; б) – нижній шар; в) – верхній шар

Конфігурація антени містить пару мікросмушкових ліній живлення разом із кільцевим щілинним випромінювачем у заземленій площині. Крім того, пара прямокутних прорізів була вставлена в задній шар (площина заземлення), щоб зменшити характеристику зв'язку портів антени. Деталі розмірів параметрів антени та остаточну конструкцію наведено в таблиці 4.1.

Конфігурації та результати S-параметрів щілинної антени з круглим кільцем, антени з щілинним випромінювачем із круглим кільцем і остаточної конструкції проілюстровано та порівняно на рис. 2а–в відповідно. Як показано на рисунку, резонанс подвійної поляризованої антени з круглим щілинним випромінювачем відбувається на частоті 7 ГГц, а завдяки перетворенню її на кругле кільце розмір резонатора збільшується, і антена резонує приблизно на 4 ГГц. Нарешті, використовуючи представлену конструкцію, показано на

рис. 2с, антена демонструє хороше узгодження імпедансу з широкою смугою пропускання та характеристиками високої ізоляції в потрібному діапазоні.

Таблиця 4.1 – Розміри параметрів конструкцій

Параметри	Величина, мм	Параметри	Величина, мм
W_{sub}	75	L_{sub}	150
h_{sub}	1.6	W_S	25
L_s	25	W_f	3
L_f	8.5	W	3
L	3.5	r	8.25
r_1	7.1	h_S	1.6

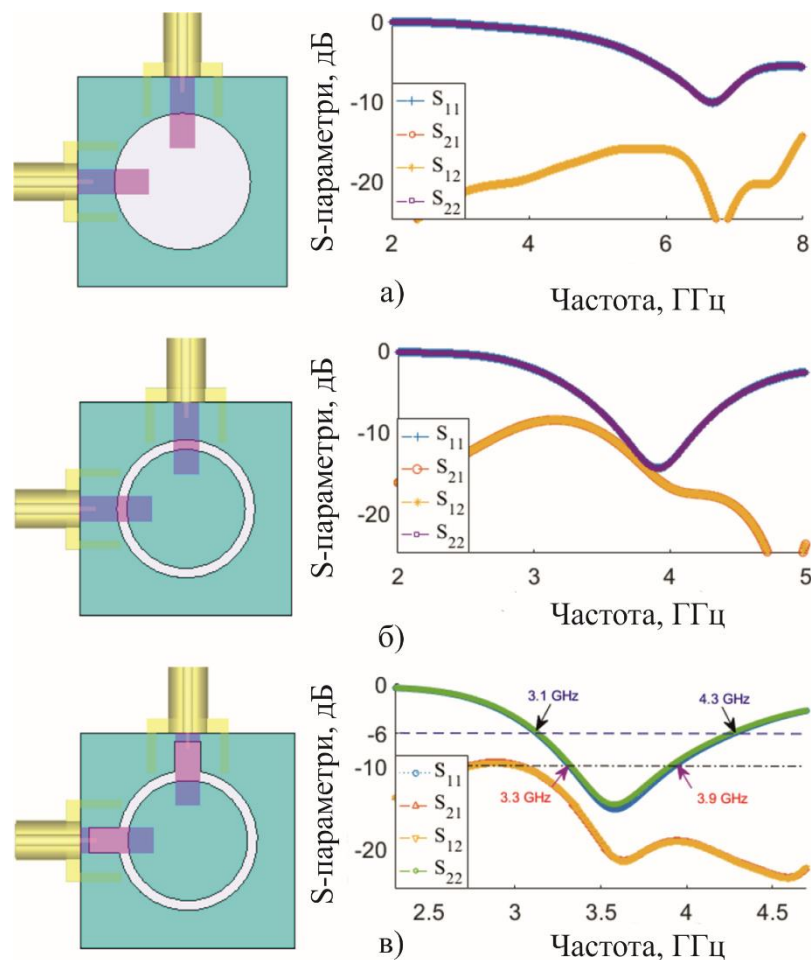


Рисунок 4.2 – Різні конфігурації та S-параметри для конструкції антени:
а) кругова; б) кругова кільцева; в) пропонований щілинний радіатор

З отриманих результатів зрозуміло, що для $S_{11} \leq -6$ дБ і $S_{11} \leq -10$ дБ одноелементна антена забезпечує смугу пропускання $> 1,2$ і $0,5$ ГГц

відповідно. Крім того, характеристика взаємного зв'язку двопортової конструкції становить < -20 дБ на резонансній частоті антени (3,6 ГГц).

Результати S-параметрів (S_{11} і S_{21}) для змінних параметрів конструкції проілюстровані на рис. 4.3а–г. На рис. 4.3а досліджено вплив ширини круглого кільця ($r-r_1$) на робочу смугу за таких умов: коли її розмір змінюється від 0,5 до 2 мм, частотний резонанс конструкції змінюється від 3,1 до 4 ГГц. На це також можна вплинути, змінивши довжину вбудованого прямокутного слота (рис. 4.3б). Як показано, частотний резонанс налаштовується на нижні або верхні частоті (без будь-яких змін у його взаємному зв'язку та частотній смузі). На рис. 4.3в зображено характеристики S_{11} і S_{21} для різних значень W (ширина прямокутної щілини) шляхом збільшення ширини прямокутної щілини, таким чином можна покращити смугу пропускання антени та її ізоляцію, особливо в її нижній смузі [28]. Однак, як показано, характеристика взаємного зв'язку (S_{21}) була зменшена. На рис. 4.3г показано характеристики параметрів S антени для різних розмірів щілинного випромінювача (r): різні значення впливають на смугу пропускання антени та ізоляцію. Однак, на відміну від W , за рахунок зменшення радіуса круглого кільця смуга пропускання антени та ізоляція можуть бути покращені на вищій робочій частоті.

Щільність струму в задньому шарі антени, а також тривимірні (3D) діаграми спрямованості на робочій частоті (3,6 ГГц) від кожного порту проілюстровано на рис. 4.4. Показано, що струми в основному розподіляються навколо щілинно-кільцевого радіатора. Як можна помітити, для різних портів живлення антени струми течуть у протилежних напрямках завдяки функції рознесення двопортової конструкції [29]. Крім того, використовувані прямокутні слоти виглядають дуже активними з високою щільністю на частоті 3,6 ГГц. Також можна побачити, що для кожного порту живлення: антена пропонує подібні діаграми спрямованості з реалізованим підсиленням >3 дБ і різними поляризаціями від портів живлення.

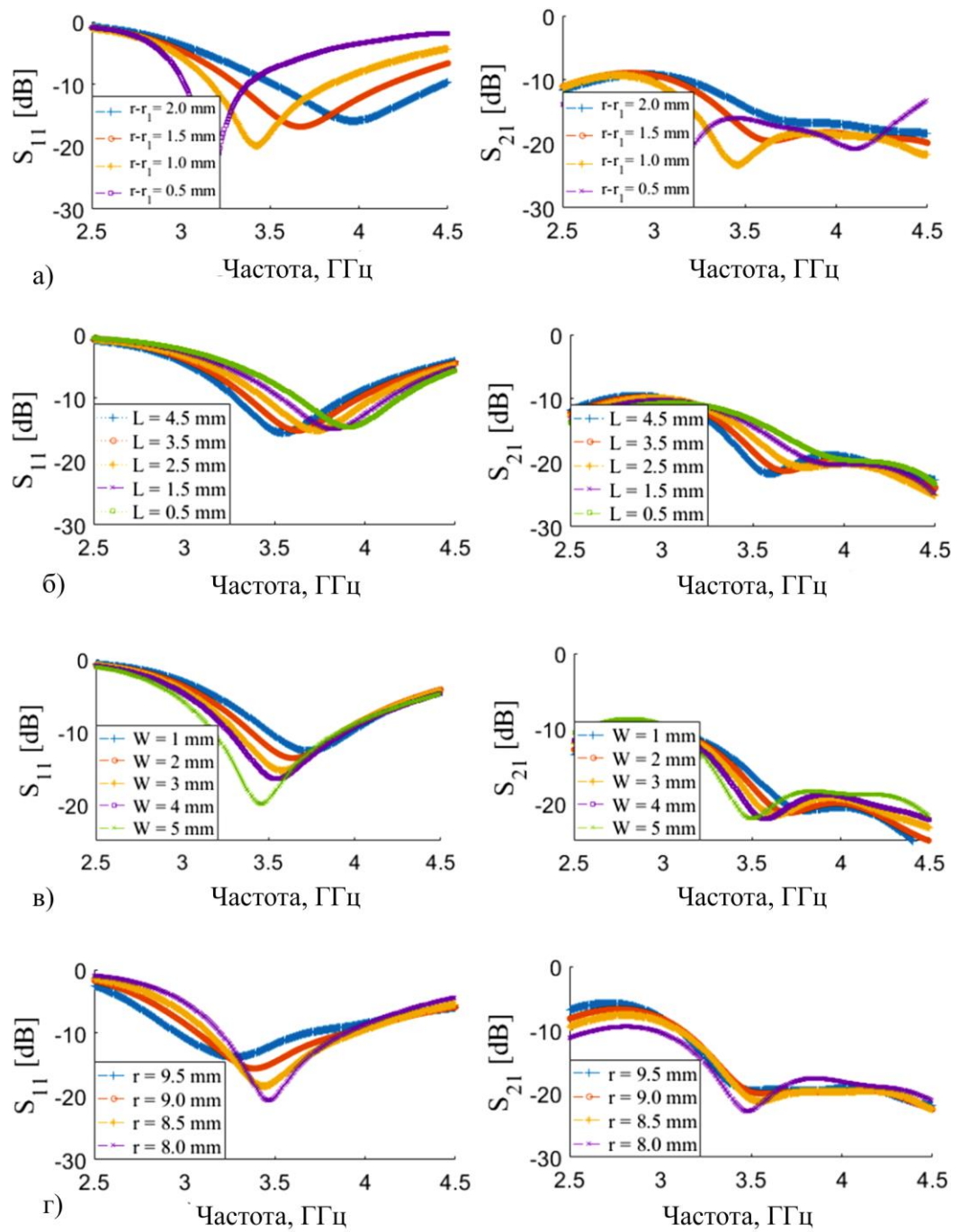


Рисунок 4.3 – Результати S_{11} і S_{21} антени для різних значень

а) $r-r_1$, б) r , в) W , г) L

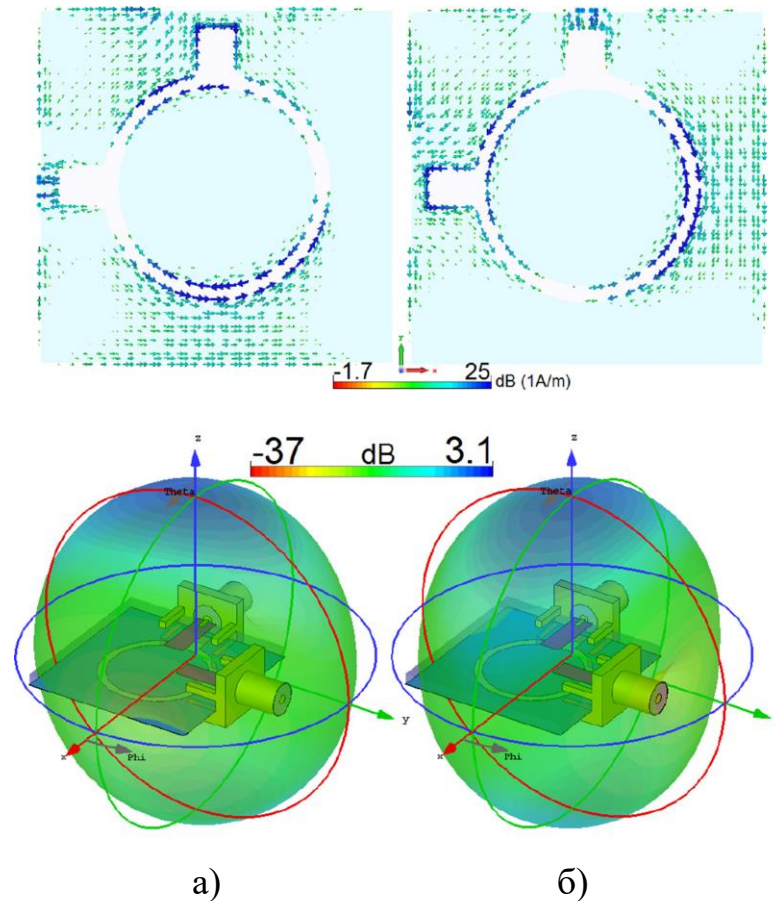


Рисунок 4.4 – Щільність струму та 3D діаграми спрямованості на частоті 3,6 ГГц для а) Порт 1, б) Порт 2

Основні характеристики випромінювання, включаючи випромінювання/загальну ефективність, максимальне підсилення та спрямованість у робочому діапазоні антени, показані на рис. 4.5. Як показано на рис. 4.5а, антена забезпечує дуже високу ефективність через низький взаємний зв'язок. У всьому робочому діапазоні було досягнуто більш ніж 80% ефективності. Крім того, антена має ефективність $> 90\%$ на робочій частоті (3,6 ГГц). Відповідно до отриманих результатів на рис. 4.5б, антена забезпечує майже постійну спрямованість і максимальні характеристики посилення в смузі пропускання 600 МГц. Для антени досягнуто близько 3,5 дБі спрямованості та 3 дБі максимального підсилення.

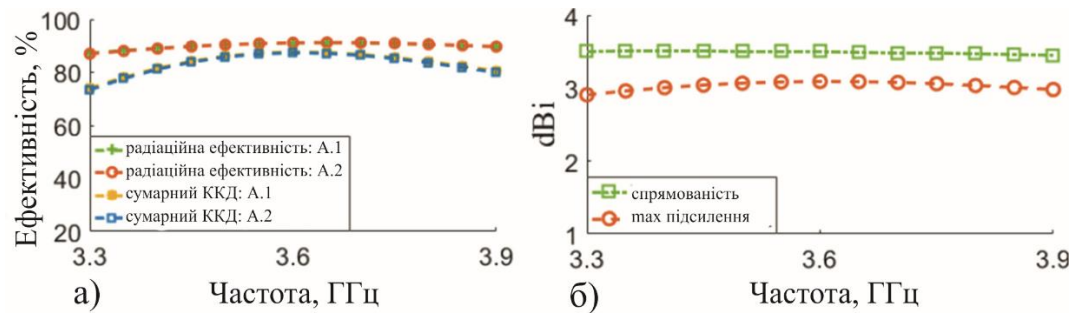


Рисунок 4.5 – Основні властивості рознесеної антени з подвійною поляризацією а) Ефективність антени (ККД), б) Спрямованість і максимальне підсилення

Було виготовлено та випробувано прототип елемента антени з подвійною поляризацією. На рис. 4.6 показано вигляд спереду/ззаду зразка прототипу. Виміряні та змодельовані S-параметри конструкції порівнюються та проілюстровані на рис. 4.7. Спостерігається, що виготовлений зразок працює належним чином близько до симуляції.

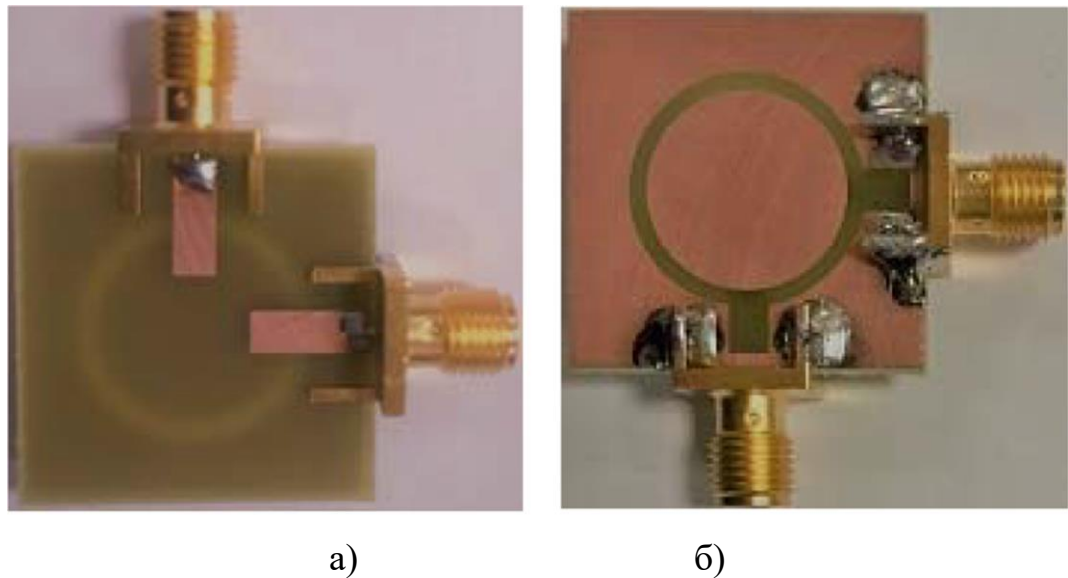


Рисунок 4.6 – Виготовлена антена та її S-параметри
а) Вигляд зверху, б) Вигляд знизу

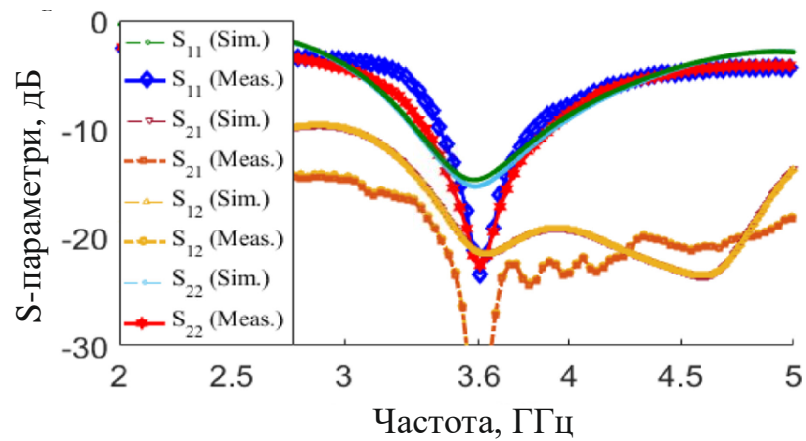


Рисунок 4.7 – Виміряні та змодельовані S-параметри

4.2 Конструкція антени МІМО для смартфона 5G

На рис. 4.8 показано передню та задню схеми конструкції антени МІМО для майбутніх смартфонів. Конструкція реалізована на підкладці FR4 (з деталями ϵ : 4,4 і δ : 0,025) розміром $75 \times 150 \times 1,6$ мм³.

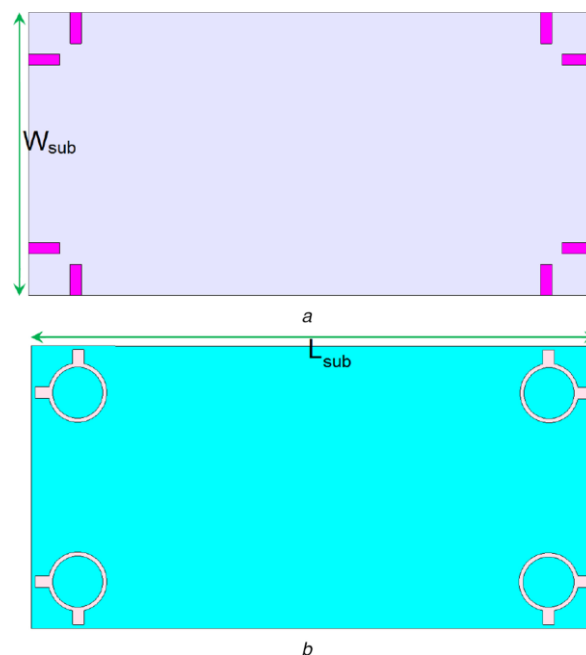


Рисунок 4.8 – Конструкція МІМО для смартфонів 5G:

а) верхній шар, б) нижній шар

Як показано на рисунку 4.8, чотири пари випромінювачів із подвійною поляризацією розміщено в різних кутах друкованої плати. Кожна пара

мікросмушкових ліній порушуватиме ортогональні поляризації, щоб підвищити продуктивність конструкції MIMO [30]. На рис. 4.9 зображено S-параметри антени (включаючи S_{nn} і S_{mn}) в робочому діапазоні антени. Антена смартфона 5G демонструє хороші результати S_{nn} , охоплюючи 3,3–3,9 ГГц, і високу ізоляцію, більше 18 дБ. Також очевидно, що елементи рознесеної антени з подвійною поляризацією забезпечують однакові частотні характеристики.

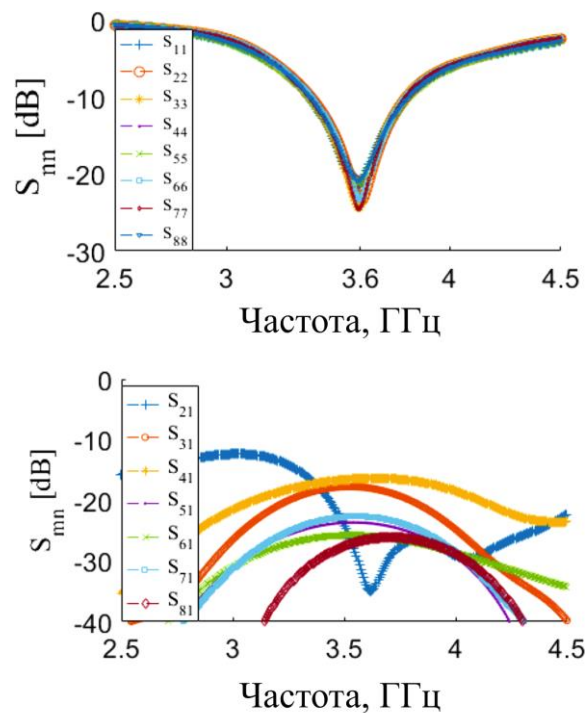


Рисунок 4.9 – Змодельовані S-параметри: а) S_{nn} , б) S_{mn}

На рис. 4.10 показані тривимірні діаграми спрямованості антен 1 і 2 на частоті 3,6 ГГц, у яких елементи антени мають квазівсеспрямовану діаграму спрямованості, яка в основному охоплює верхню та нижню сторони друкованої плати смартфона. Завдяки цьому кільцеподібна антена є хорошим вибором для використання в конструкції антени смартфона порівняно з іншими мікросмушковими антенами, такими як патч-антена, диполь та антена Yagi (Антенна «хвильовий канал»). Крім того, елементи антени є мініатюрними та забезпечують подвійне живлення/ функцію подвійної поляризації [31, 32]. Конструкційні діаграми спрямованості показані на рис. 4.11. Як можна

помітити, кожна сторона материнської плати покрита різною вертикально/горизонтально поляризованою діаграмою спрямованості. Таким чином, антена смартфона показала хороше покриття випромінюванням, а поляризаційне різноманіття підтверджує її потенціал для майбутніх смартфонів.

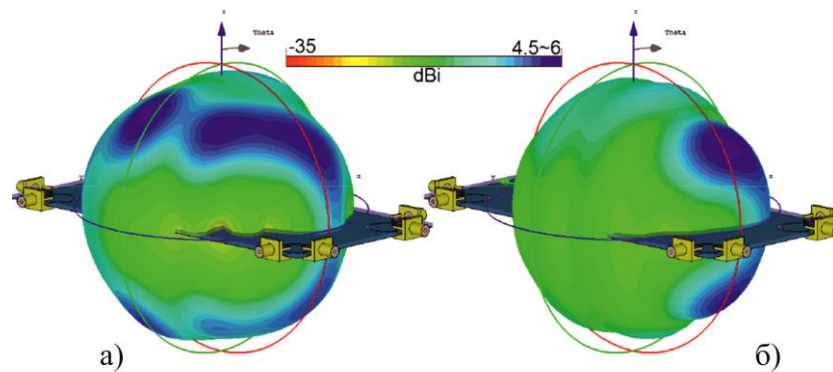


Рисунок 4.10 – Тривимірні діаграми спрямованості від
а) Порт 1, б) Порт 2

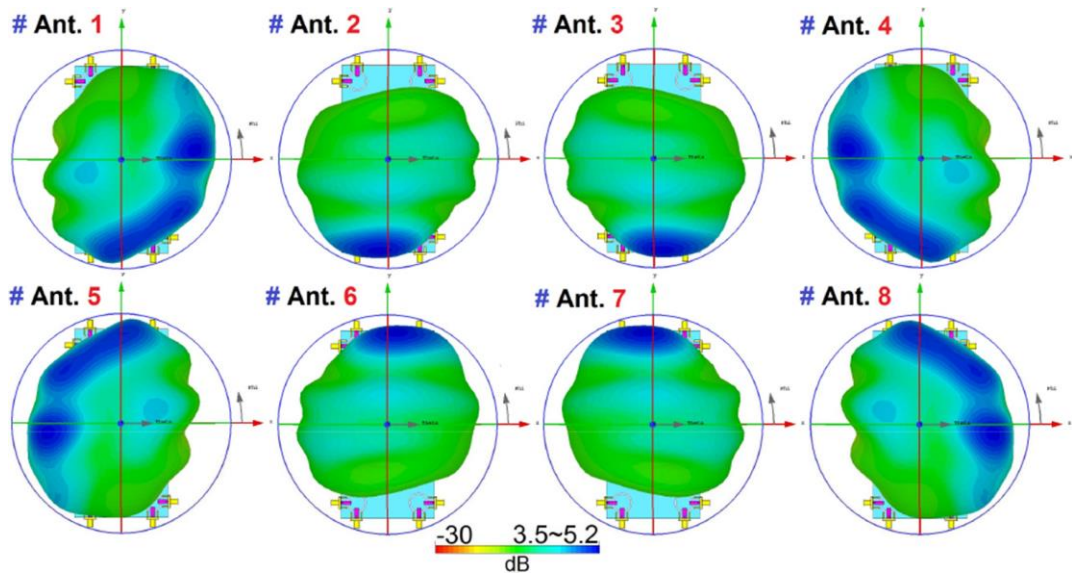


Рисунок 4.11 – Шаблони тривимірних масивів конструкцій смартфона
5G

Крім того, висока ефективність з невеликими варіаціями досягається в діапазоні 3,3–3,9 ГГц, як показано на рис. 4.12: >75% ефективності було досягнуто для елементів конструкції MIMO на 3,6 ГГц.

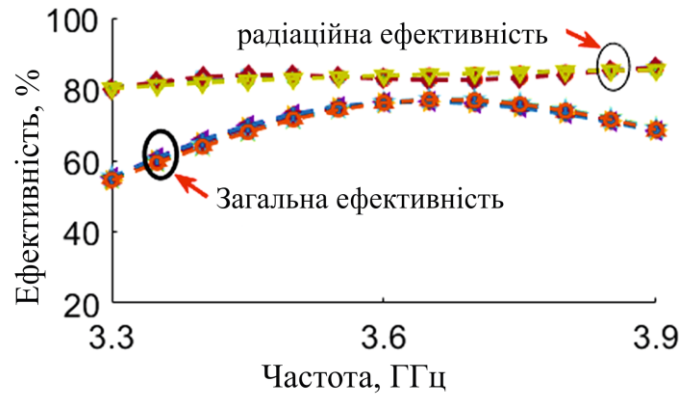


Рисунок 4.12 – Ефективність конструкції масиву МІМО

Види прототипу зверху і знизу показані на рис. 4.13а і б відповідно. МІМО-антена смартфона побудована на недорогій підкладці 1,6 мм FR4 розміром 75×150 мм². Його властивості з точки зору S-параметрів, діаграм спрямованості та рівнів підсилення були належним чином виміряні.

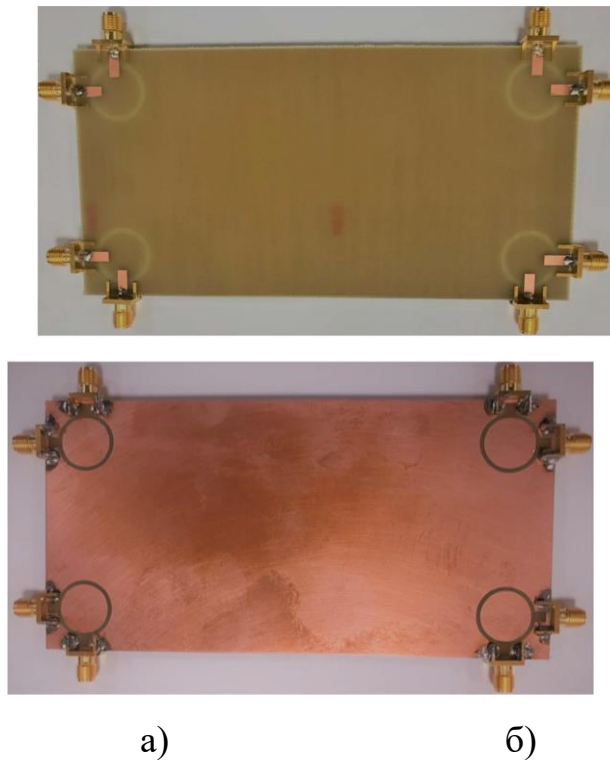


Рисунок 4.13 – Фотографія виготовленого прототипу:

а) вигляд зверху, б) вигляд знизу

Слід зазначити, що для вимірювання результатів антени один порт залишався збудженим, а інші завантажувалися навантаженнями 50 Ом. Рис. 4.14а і б ілюструють виміряні/змодельовані S-параметри (S_{11} – S_{88} і S_{21} – S_{81}) випромінювачів рознесеної антени. Можна помітити, що круглі кільцеві рознесені щілинні антени пропонують хороші S-параметри з досить хорошою смугою пропускання імпедансу ($S_{11} < -10$ дБ у межах 3,3–3,9 ГГц) і низьким взаємним зв'язком ($S_{21} < -18$ дБ). Існує певне відхилення від вимірювань і моделювання, яке могло бути в основному через помилки в процесах виготовлення, подачі та вимірювання.

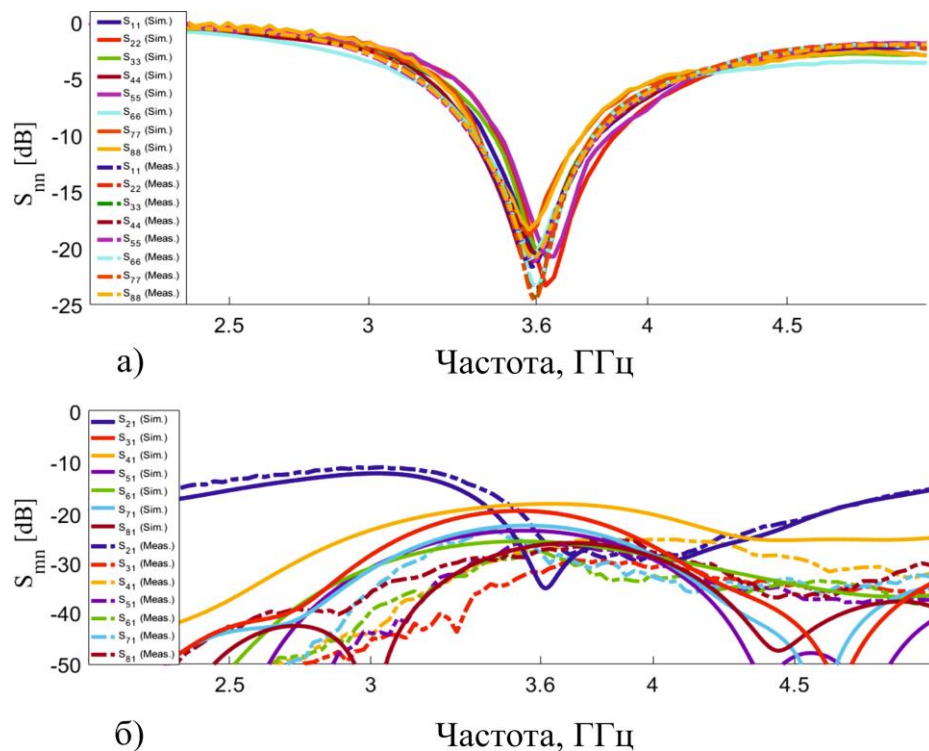


Рисунок 4.14 – Результати виміряних і змодельованих S-параметрів

а) S_{mn} (S_{11} – S_{88}), б) S_{mn} (S_{21} – S_{81})

Як видно з рис. 4.11, випромінювачі антени з подібною поляризацією та розміщенням демонструють подібні діаграми спрямованості. Таким чином, для виготовленого прототипу були виміряні діаграми спрямованості

одноелементних/подвійних резонаторів для антен 1 і 2 на резонансній частоті (3,6 ГГц). Змодельовані та виміряні 2D полярні діаграми спрямованості проілюстровано на рис. 4.15. Як показано, конструкція демонструє хороші діаграми спрямованості. Крім того, елементи антени демонструють підсилення IEEE близько 5 дБі в центральній робочій смузі.

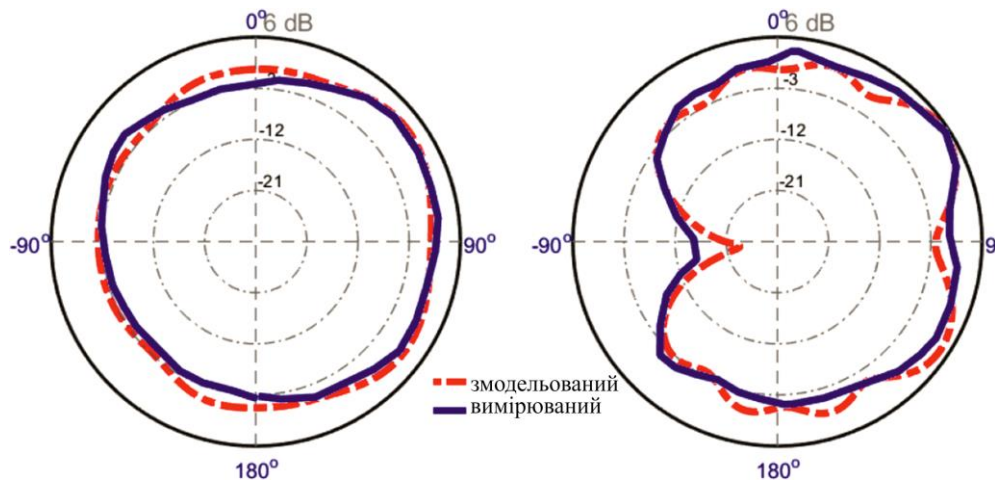


Рисунок 4.15 – Виміряні та змодельовані діаграми спрямованості полярного випромінювання на частоті 3,6 ГГц для: а) Ant.1, б) Ant.2

Для того, щоб переконатися, що антена є компетентною для рознесення в каналах MIMO, ECC і TARC є двома важливими параметрами, які слід досліджувати [33, 34]. Характеристики ECC і TARC антени MIMO можна розрахувати за результатами S-параметрів за допомогою наведених нижче формул

$$ECC = \frac{|S_{mm}^* S_{mn} + S_{nm}^* S_{nn}|^2}{(1 - |S_{mm}|^2 - |S_{mn}|^2)(1 - |S_{nm}|^2 - |S_{nn}|^2)^*}. \quad (4.1)$$

$$TARC = \sqrt{\frac{(S_{mm} + S_{mn})^2 + (S_{nm} + S_{nn})^2}{2}}. \quad (4.2)$$

Рис. 4.16а і б показують розраховані ECC і TARC. Як видно з рисунків, розраховані результати ECC і TARC дуже низькі в межах діапазону. Можна спостерігати, що конструкція MIMO демонструє $<0,01$ ECC по всій смузі частот і доводить, що сусідні елементи не мають значення. Крім того, його функція TARC становить < -35 на 3,6 ГГц. Згідно з отриманими результатами, конструкція дуже підходить для застосування MIMO.

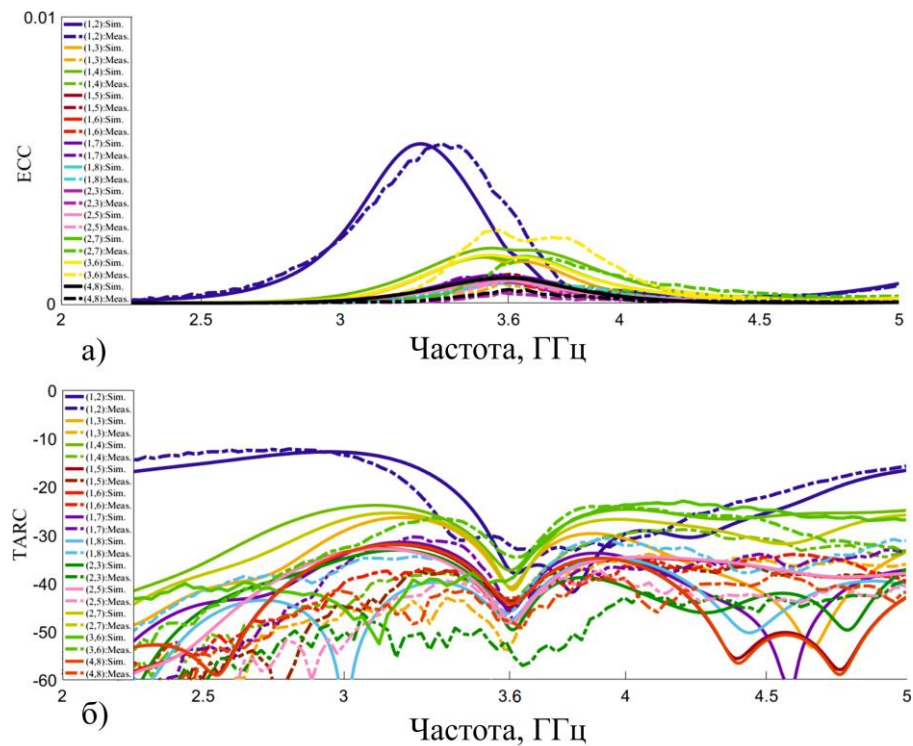


Рисунок 4.16 – Розрахована продуктивність MIMO антени на основі вимірюних та змодельованих S-параметрів: а) ECC, б) TARC

Іншим важливим параметром для оцінки продуктивності MIMO багатоантенної конструкції є втрати в каналі, які утворюються в результаті взаємної кореляції елементів антени в системах MIMO [35]. Рівень зниження продуктивності системи можна визначити втратою ємності. Втрата ємності системи MIMO в основному залежить від S-параметрів. Втрати в каналі системи 8×8 MIMO можна розрахувати за допомогою формул:

$$CL = -\log_2 \det(\Psi^R), \quad (4.3)$$

$$\Psi^R = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \cdots & \rho_{18} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{81} & \cdots & \rho_{88} \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

де

$$\rho_{ii} = 1 - (|S_{ii}|^2 + |S_{ij}|^2);$$

$$\rho_{ij} = -(S_{ii}^* S_{ij} + S_{ji}^* S_{ij}) \text{ для } i, j = 1, \dots, 8$$

Слід зазначити, що прийнята межа CCL становить $\leq 0,4$ біт/с/Гц [36]. Як видно з рис. 4.17а, запропонована конструкція MIMO має дуже низький CCL у всьому робочому діапазоні: для системи MIMO досягається $< 0,4$ біт/с/Гц у діапазоні частот 3,3–3,9 ГГц. Для подальшого дослідження продуктивності MIMO запропонованої системи антени смартфона розрахована пропускна здатність каналу (CC) – показана на рис. 4.17б. Пропускна здатність каналу можна визначити наступним чином:

$$CC = E \left\{ \log_2 \left[\det \left(I + \frac{SNR}{n_T} \right) H_{scale} H_{scale}^T \right] \right\}, \quad (4.5)$$

а матрицю каналу H_{scale} можна розрахувати наступним чином:

$$H_{scale} = \sqrt{\rho_{scale,RX}} H_{i.i.d} \sqrt{\rho_{scale,TX}} \quad (4.6)$$

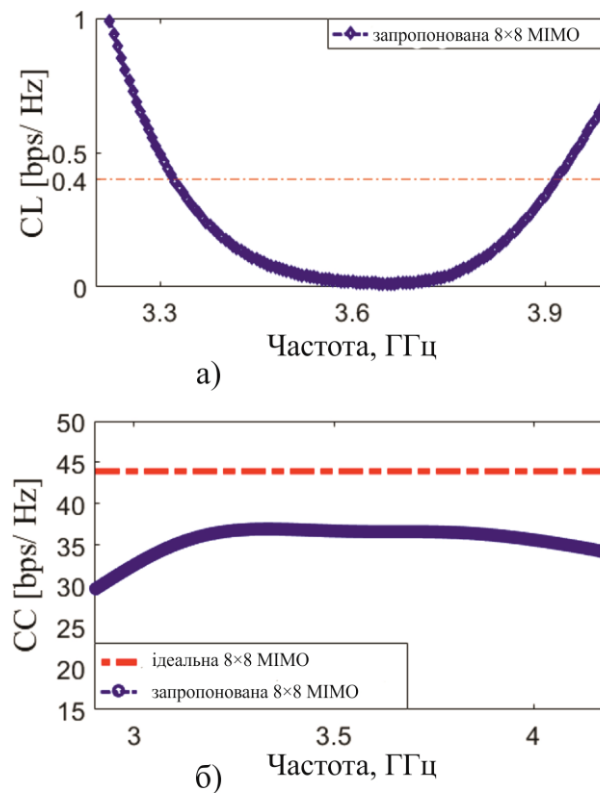


Рисунок 4.17 – Розрахункова продуктивність каналу

а) CC, б) CL

Як видно з рис. 4.17б, розрахована пропускна здатність каналу CC запропонованої конструкції в межах бажаного діапазону частот є кращою, ніж 35 біт/с/Гц, тоді як для ідеального випадку це значення становить 44 біт/с/Гц [37]. У таблиці 4.2 представлено порівняння між представленою антенною решіткою смартфона та деякою іншою односмуговою антенною решіткою смартфона, про яку нещодавно повідомлялося [11–22]. Отже, запропонована конструкція забезпечує кращі характеристики з точки зору ефективності, ізоляції та ЕСС. Крім того, вона забезпечує ширшу смугу частот 3,3–3,9 ГГц (600 МГц) із функцією рознесення, що підтримує обидві сторони материнської плати.

Таблиця 4.2. Порівняльні параметри між запропонованою конструкцією та відомими антенами смартфона 5G

Тип конструкції	Смуга пропускання, ГГц	ККД, %	Розмір, мм ²	Ізоляція, дБ	ЕСС
перевернутий-F	3.4–3.6	55–60	100×50	10	—
МОНОПОЛЬ	4.55–4.75	50–70	136×68	10	—
самоізолюваний монополь	3.4–3.6	60–70	150×75	18	<0.015
щільно розташовані пари	3.4–3.6	50–70	150×73	17	<0.07
петля	2.55–2.6	48–63	136×68	11	<0.15
слот	3.4–3.8	50–75	150×75	16	<0.01
вбудований хвилевід	3.4–3.6	50–80	150×75	15	<0.2
перевернутий-L монополь	3.4–3.6	40–60	136×68	14	<0.2
перевернутий-F	3.4–3.6	—	120×70	19	—
МОНОПОЛЬ	3.4–3.6	35–50	150×75	11	<0.40
самодоповнюючий	3.55–3.65	52–76	150×75	11	<0.02
МОНОПОЛЬНИЙ слот	2.55–2.68	48–63	136×68	12	<0.15
круглий кільцевий слот	3.3–3.9	60–80	150×75	18	<0.005

4.3 Вплив користувача на характеристики антени

У цьому розділі розглядається вплив рук і голови людини на властивості розробленої MIMO-антени з точки зору коефіцієнта відбиття (S_{nn}), загальної ефективності та коефіцієнта посилення антени [38, 39]. Досліджуються різні пози використання, включаючи торкання правою та лівою руками верхнього та заднього шарів. Згідно з моделюванням, показаним на рис. 4.18, конструкція MIMO та її елементи випромінювання демонструють хороші характеристики та забезпечують достатню загальну ефективність поблизу людської руки.

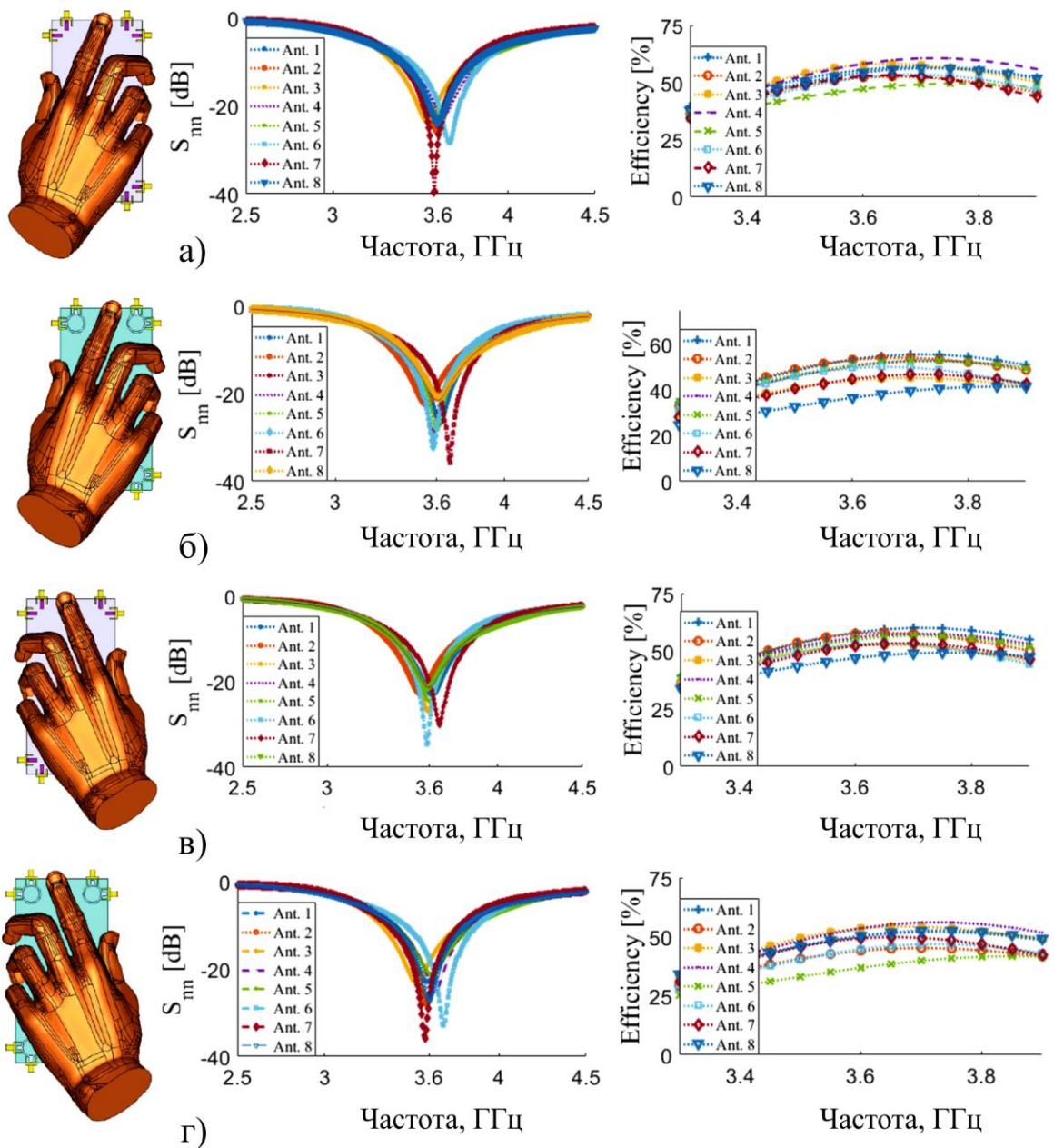


Рисунок 4.18 – Коефіцієнта відбиття S_{nn} та ефективність антени МІМО для режимів з розташуванням рук користувача: а) Правий/передній шар, б) Правий/нижній шар, в) Лівий/передній шар, г) Лівий/нижній шар

Завдяки своїй симетричній конфігурації антена МІМО працює майже однаково для даних досліджуваних режимів. Однак, як видно з рис. 4.18б і г, ефективність антени зменшилася трохи більше, порівняно з рис. 4.18а і в. Головним чином, це пов'язано з розташуванням випромінювачів антени (прорізи з круглими кільцями) на задньому шарі друкованої плати смартфона.

Крім того, максимальне зниження характеристик випромінювання спостерігається для елементів, які були частково закриті рукою користувача, включаючи антену 5 і антену 8 у режимах верхнього та заднього шарів. Це зменшення пов'язано з властивостями тканин тіла, які можуть сильно поглинати потужність випромінювання антени.

Загалом запропоновані елементи антени забезпечують 35–60% загальної ефективності в робочому діапазоні. Прозорі зображення тривимірних діаграм спрямованості в режимі розмови для кожного елемента випромінювання на частоті 3,6 ГГц представлені на рис. 4.19. Загалом, конструкція забезпечує достатнє покриття випромінюванням і значення підсилення для кожного випромінювача з круглим кільцем. Ефективність випромінювання рознесеної антени залежить від її розташування та відстані від тіла людини. Рівень підсилення антени варіюється від 0,5 до 4,1 дБ.

Питомий коефіцієнт поглинання (SAR) є критичним питанням для антенних систем смартфонів для вимірювання електромагнітного поглинання людського тіла [40]. Характеристика SAR антени МІМО з головою користувача досліджується та представлена на рис. 4.20. Як можна помітити з результатів, максимальне (2,9) і мінімальне (0,8) значення коефіцієнта питомого поглинання для проекту поглинаються з Ant.1 і Ant. 7 відповідно. Можна зробити висновок, що близька відстань між елементами та фантомом голови призводить до максимального значення SAR і навпаки.

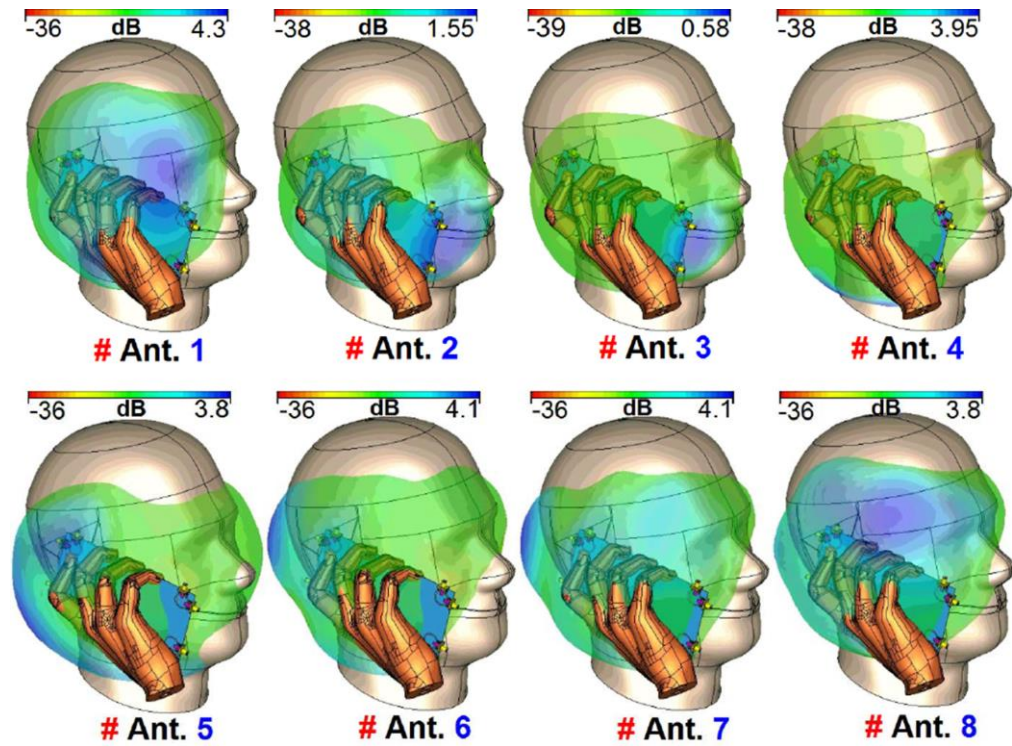


Рисунок 4.19 – Прозорі види 3D діаграм спрямованості в режимі розмови

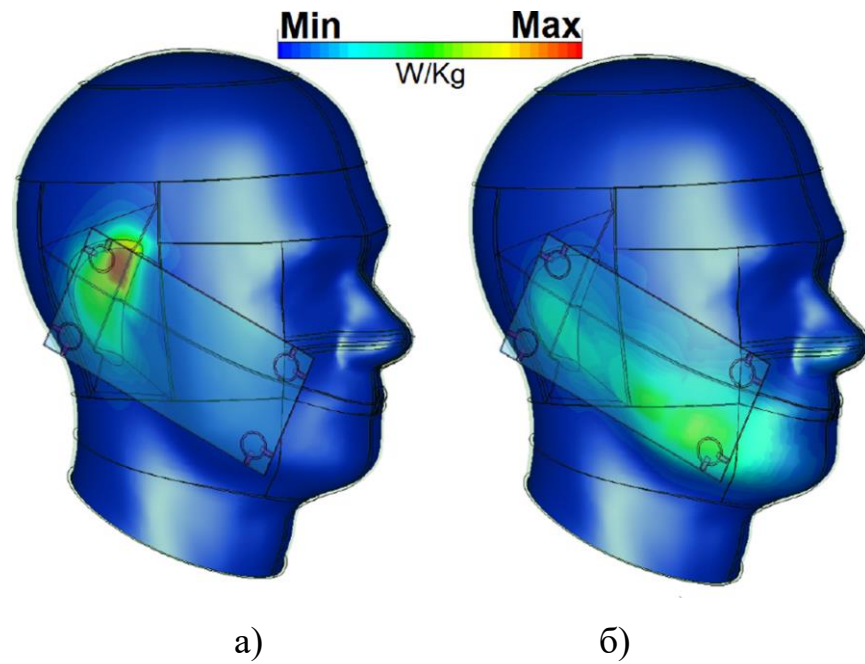


Рисунок 4.20 – Аналіз SAR конструкції MIMO для
а) Ant. 1, б) Ant. 7

На рис. 4.21 показана продуктивність запропонованої антени МІМО за наявності таких компонентів смартфона, як металева рамка, динамік, роз'єм USB, рідкокристалічний (РК) екран та інші. Досліджено розміщення, коефіцієнт відбиття (S_{nn}), сумарний ККД та діаграми спрямованості елементів антени. Як показано, деякі варіації S_{nn} антени спостерігаються в цільовій смузі частот. Крім того, загальні ККД елемента знижуються з 60–80% до 20–40%. Крім того, суміжні елементи забезпечують підсилення на 3–4 дБ із зменшенням на 2 дБ у порівнянні з результатами на рис. 4.10.

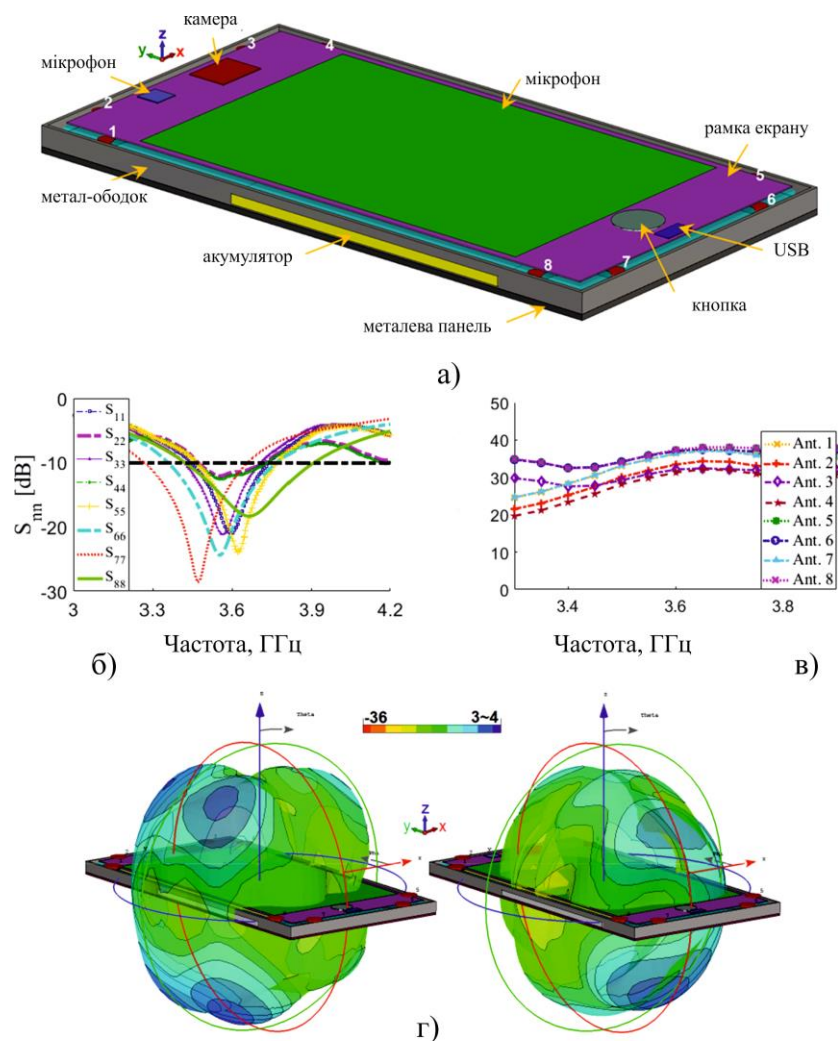


Рисунок 4.21 – Ефективність антени за наявності компонентів смартфона а) Інтеграція компонентів, б) S_{nn} , в) Загальна ефективність, г) Діаграма спрямованості суміжних елементів

Відповідно до отриманих результатів, спостерігається значне зниження продуктивності антени. В основному це пов'язано з розміщенням металевої панелі дисплея (РК-екрана), яка може діяти як відбивач і впливати на характеристики елементів антени. Тим не менш, як показано на рис. 4.21б і в, елементи все ще резонують навколо бажаних 3,6 ГГц і можуть забезпечити >30% ККД. Крім того, діаграми спрямованості елементів все ще можуть охоплювати як верхню, так і нижню сторони друкованої плати.

Завдяки гнучкій частотній характеристикі елементів антени, наведеній на рис. 4.3, характеристики запропонованої МІМО-антени за наявності компонентів можна покращити шляхом налаштування та регулювання розміру випромінювачів для охоплення бажаної робочої смуги. Крім того, щоб зменшити вплив компонентів смартфона, таких як екран і металева панель, конфігурація елементів антени також може бути змінена, щоб займати меншу частину материнської плати, що може бути предметом майбутніх досліджень.

4.4 Дводіапазонна/багатодіапазонна характеристика запропонованої конструкції кільцевої щілинної антени

Нижче пропонується новий метод живлення для генерації подвійної/багатодіапазонної функції без будь-яких змін на головному випромінювачі (антена з кільцевим щілиною). У запропонованому методі, як показано на рис. 4.22, мікросмужкова лінія живлення перетворюється з прямокутної форми на несиметричну U-подібну лінію живлення, що створює мікросмужкову лінію подвійного живлення.

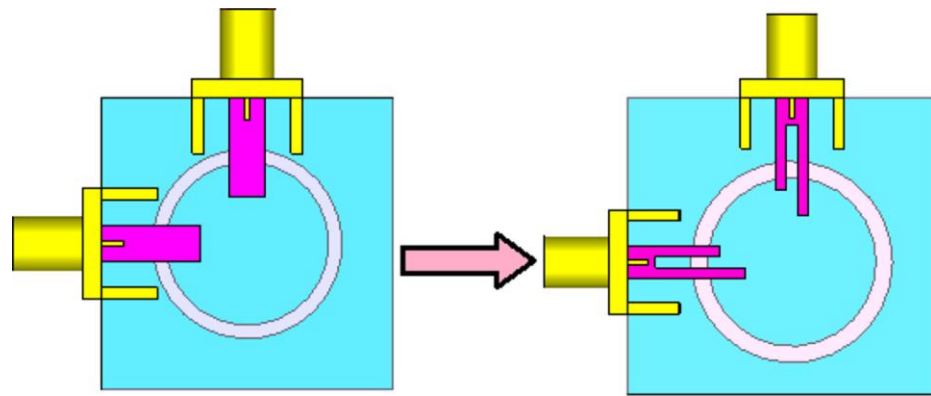


Рисунок 4.22 – Новий метод живлення конструкції антени

Завдяки різній довжині плечей живлення можна отримати дводіапазонну характеристику, що охоплює 3,6/5,5 ГГц (<6 ГГц). Різні конфігурації та S-параметри (S_{11}/S_{21}) ліній живлення, засновані на розташуванні плечей лінії живлення, проілюстровано на рис. 4.23. Можна помітити, що антена має різні характеристики коефіцієнта відбиття (S_{11}) і взаємного зв'язку (S_{21}) [41].

Згідно з отриманим результатом, очевидно, що для досягнення достатнього S_{11} і низького S_{21} найкращим розташуванням є розміщення коротших плечей близько один до одного, як показано на рис. 4.23г. Як показано, антенний елемент може забезпечувати хорошу дводіапазонну характеристику на 3,6/5,5 ГГц у діапазонах 5G на рівні 6 ГГц. Слід зазначити, що крім першого та другого резонансів антени на 3,6/5,5 ГГц, антена також створює інший резонанс на 6,6 ГГц, який є другою гармонікою першого резонансу.

Схематичне зображення MIMO представленої антени смартфона реалізовано на друкованій платі смартфона та виміряно її S-параметри. На рис. 4.24 показано виготовлений прототип і виміряні результати S_{nn}/S_{mn} . Як можна помітити, на відміну від конструкції антени в [42], запропонована антена для смартфона MIMO здатна демонструвати хороші багатодіапазонні характеристики з достатнім взаємним зв'язком (<-10 дБ) на 3,6, 5,5 і 6,6 ГГц.

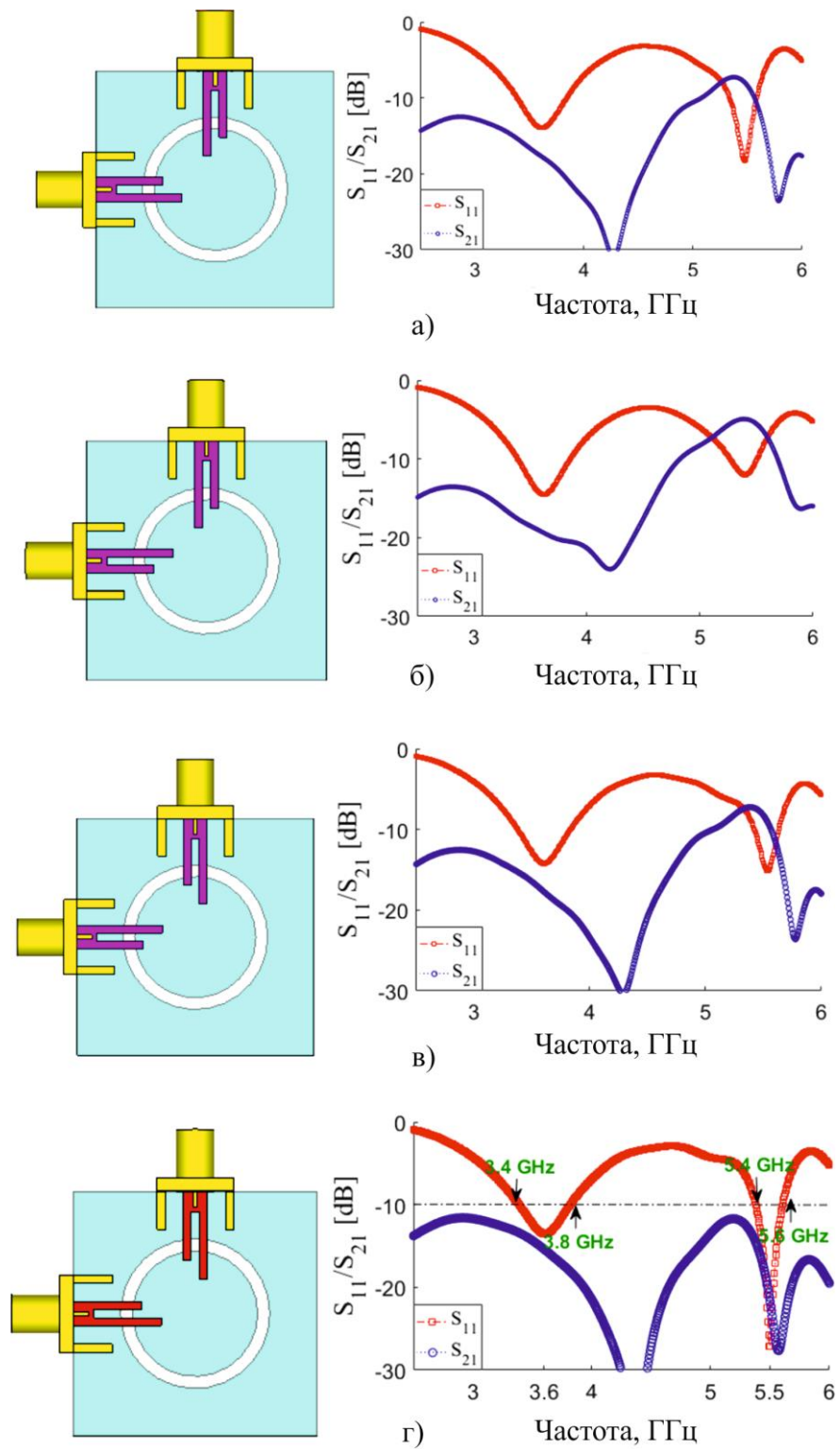


Рисунок 4.23 – Різні конфігурації та S-параметри конструкції дводіапазонної антени за новим методом живлення

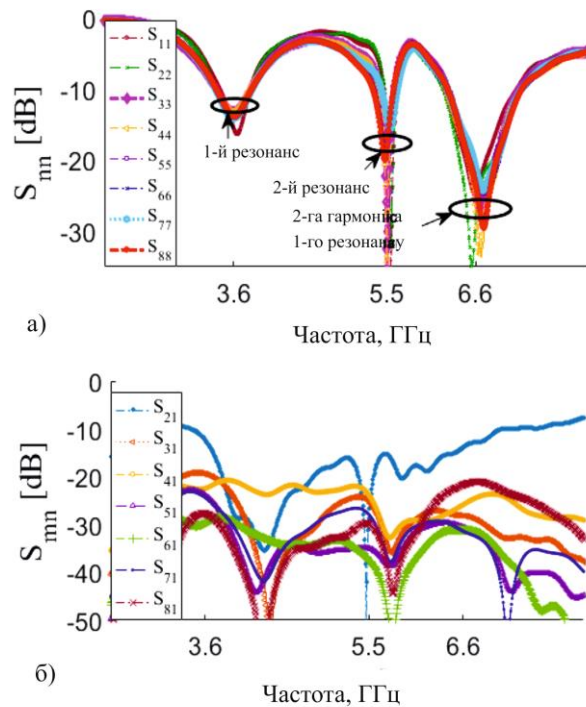


Рисунок 4.24 – Багатодіапазонна конфігурація та її S-параметр

а) Прототип, б) S_{nn} , в) S_{mn}

4.5 Інтеграція міліметрової хвилі фазованої решітки в запропоновану антену смартфона МІМО

Очікується, що, окрім смуг частот нижче 6 ГГц, майбутні смартфони охоплюватимуть діапазон міліметрових хвиль [43–45]. Нижче запропоновано нову та компактну міліметрову хвильову фазовану антену 5G із функцією широкосмугового зв'язку, яка буде включена в спільний корпус та інтегрована в друковану плату смартфона.

На рис. 4.25а і б показано конфігурацію та результат S_{11} для одноелементної антени міліметрових хвиль. Він складається з складеної

дипольної антени з дискретним живленням і єдиним директором, що забезпечує режим випромінювання кінцевого пучка. Значення параметрів (в мм) конструкції наступні: $X = 2$, $Y = 0,2$, $X_1 = 3$, $Y_1 = 1$, $X_2 = 2,6$, $Y_2 = 0,15$, $X_3 = 0,15$, $Y_3 = 1,5$, $X_4 = 0,125$. Запропонована конструкція лінійної фазованої решітки містить вісім лінійно розташованих елементів складчасто-дипольних випромінювачів. Як видно з рис. 4.25в, він має компактний розмір $W_x \times L_x = 3,5 \times 40$ мм², що робить його придатним для легкої інтеграції в різні частини друкованої плати.

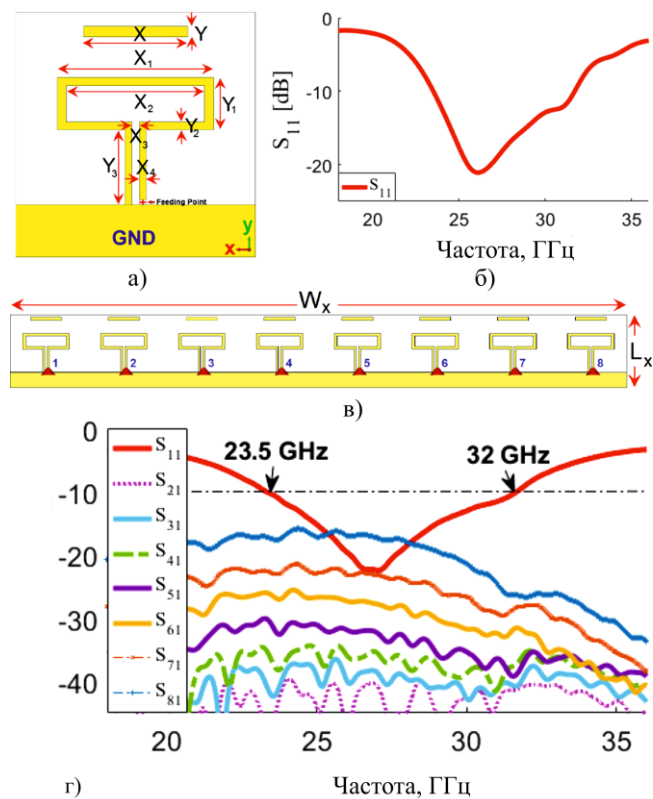


Рисунок 4.25 – Антенна решітка з фазованою решіткою хвильового діапазону: а) Одноелементна конструкція, б) Одноелементна конструкція S_{11} , в) Конфігурація масиву, г) Конфігурація S-параметрів масиву (S_{11} – S_{81})

На рисунку 4.25г показано результати S-параметрів масиву. Очевидно, що запропонована лінійна решітка забезпечує дуже широку смугу імпедансу 23,5–32 ГГц, що охоплює різні діапазони мм-хвиль 5 G, включаючи 26, 28 і 30

ГГц. Крім того, було досягнуто достатнього взаємного зв'язку (≤ -17 дБ) для елементів антени.

На рис. 4.26 показано різні можливі варіанти розміщення фазованої решітки міліметрових хвиль. Можна помітити, що завдяки низькопрофільним характеристикам запропоновану лінійну матрицю можна розмістити на різних чотирьох сторонах друкованої плати [49, 50]. Перший режим полягає в тому, щоб врізати його у верхній і нижній частинах, які можуть забезпечити необхідне повне радіаційне покриття. Однак масив також можна використовувати з правого/лівого боку друкованої плати, якщо антени 3G/4G потрібні для використання випромінювача між антенними елементами MIMO 5G на частоті 6 ГГц.



Рисунок 4.26 – Різні варіанти розміщення запропонованої фазованої антенної решітки мм-хвиль на друкованій платі смартфона

Щоб продемонструвати достатню продуктивність фазованої решітки, її функція керування променем під різними кутами сканування представлена на рис. 4.27а. Можна помітити, що конструкція фазованої решітки демонструє хорошу функцію керування променем, режим випромінювання в кінці пучка та достатній рівень посилення [50]. Основний промінь масиву, коли він розташований в іншій частині друкованої плати смартфона, зображено на рис. 4.27б. Відповідно до отриманого результату можна зробити висновок, що решітка має достатню та однакову радіаційну характеристику кінцевого пучка в різних місцях розташування.

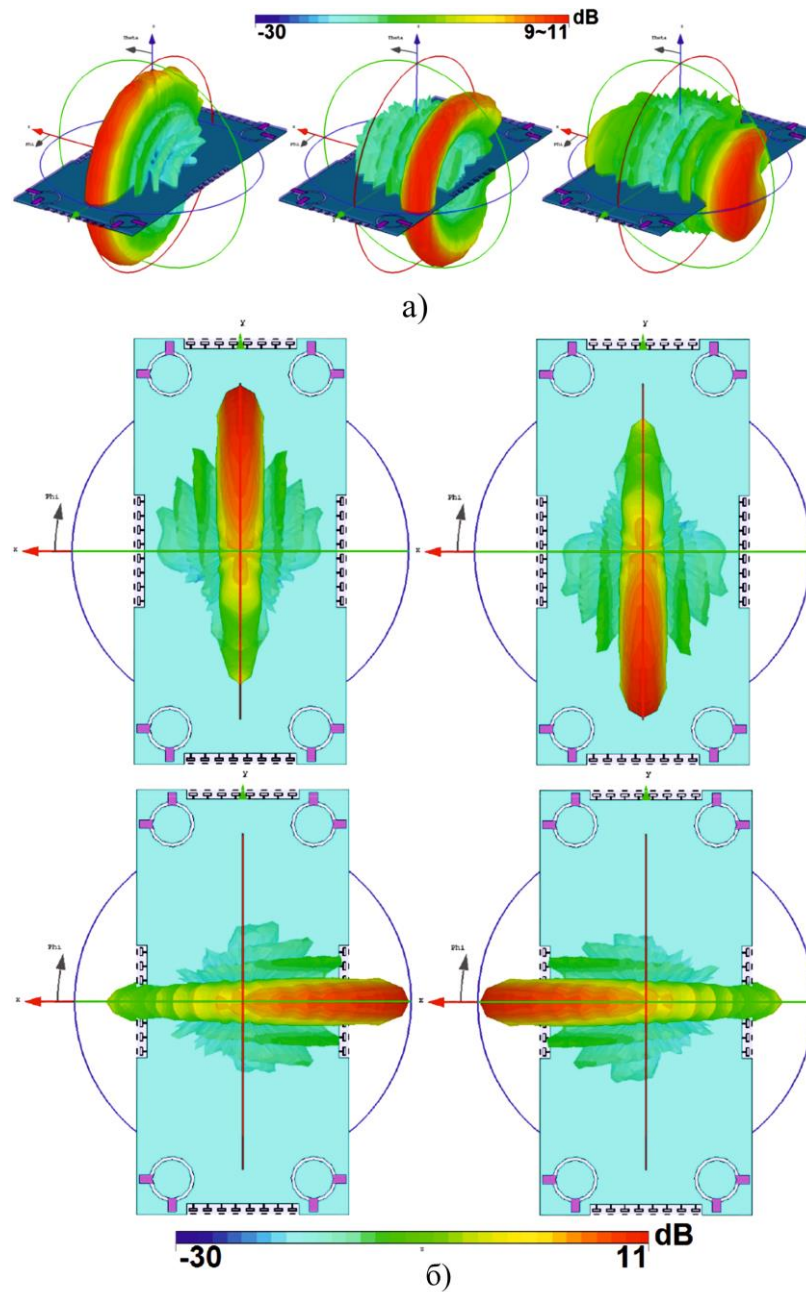


Рисунок 4.27 – Промені випромінювання антенних решіток:

- а) Керування променем антенної решітки 1 під кутами 0° , 30° і 60° ;
- б) Головні промені антенних решіток

Висновки

У четвертому розділі проведено моделювання ортогональної подвійної поляризованої антенної решітки MIMO. Розглянено будову блоків систем MIMO, які використовують три ключові концепції, а саме просторове рознесення, просторове мультиплексування та формування променя.

Також у даному розділі розглядається вплив рук і голови людини на властивості розробленої МІМО-антени з точки зору коефіцієнта відбиття, загальної ефективності та коефіцієнта підсилення антени. Досліджувались різні пози використання, включаючи торкання правою та лівою руками верхнього та заднього шарів. Згідно з моделюванням, конструкція МІМО та її елементи випромінювання демонструють хороші характеристики та забезпечують достатню загальну ефективність поблизу людської руки.

ВИСНОВКИ

Представлено нову конструкцію антени МІМО з випромінювачами з ортогональною подвійною поляризацією для смартфонів 5G. Її конфігурація використовує вісім портів/чотири випромінювачі модифікованих круглих кільцевих випромінювачів, розташованих на чотирьох краях материнської плати мобільного телефону. Частота роботи випромінювачів становить від 3,3 до 3,9 ГГц з резонансом 3,6 ГГц. Досліджуються фундаментальні властивості конструкції антени смартфона, включаючи S-параметр, ефективність, діаграми спрямованості, результати ECC і TARC. Зразок прототипу розробленої МІМО-антени було виготовлено та надано її вимірювання.

Крім того, в роботі наведені характеристики антени в присутності користувача. Конфігурація антени проста і легка для виготовлення за допомогою технології друкованих схем. Результати показали, що антена має достатні характеристики, що відповідають вимогам для використання в мобільних телефонах 5G.

Використовуючи нову техніку живлення, запропонована антенна решітка смартфона також може генерувати дво- або багатодіапазонну характеристику. Крім того, завдяки наявності вільного простору в конструкції антени смартфона, компактну мм-хвильову фазовану антену з широкою смугою пропускання та кінцевими пучками випромінювання можна легко опитувати на антені смартфона 5G.

Анотація: Представлено конструкцію антени з декількома входами/багатьма виходами (MIMO) для майбутніх смартфонів. Запропонована конструкція містить чотири пари круглих кільцевих резонаторів з подвійним живленням, розташованих на різних краях друкованої плати (ДП РСВ - printed circuit board) смартфона з підкладкою FR-4 і розміром 75×150 мм². Елементи антени живляться мікросмужками 50 Ом і забезпечують функцію поляризації та рознесення діаграми спрямованості завдяки ортогональному розміщенню їх ліній живлення. Вставляючи прямокутний проріз під кожною мікросмужковою лінією живлення, характеристика взаємного зв'язку антенних портів зменшується. Для антенної решітки смартфона було отримано хорошу смугу частот ($S_{11} \leq -10$ дБ) 3,3 – 3,9 ГГц. Тим не менш, для $S_{11} \leq -6$ дБ це значення становить 3,1 – 4,3 ГГц. Для одноелементного випромінювача досягнуто більше 3 дБ реалізованого підсилення та 80% загальної ефективності. Конструкція забезпечує не тільки достатнє покриття випромінюванням, що підтримує різні сторони материнської плати, але й різноманітність поляризації. Крім того, достатні властивості отримані поблизу людини-руки/людини-голови. Запропонована конструкція антени MIMO також здатна генерувати дво- або багатодіапазонну функцію. Крім того, представлена нова компактна конструкція антени з фазованою решіткою міліметрового діапазону (міліметрового діапазону) з кінцевими пучками випромінювання, які можна легко інтегрувати в смартфони.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nadeem, Q.-U.-A., Kammoun, A., Debbah, M., et al.: ‘Design of 5G full dimension massive MIMO systems’, *IEEE Trans. Commun.*, 2018, 66, pp. 726–740
2. Osseiran, A., Boccardi, F., Braun, V., et al.: ‘Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project’, *IEEE Commun. Mag.*, 2014, 52, pp. 26–35
3. Yang, H.H., Quel, Y.Q.S.: ‘Massive MIMO meet small cell: Backhaul and cooperation’ (Springer International, Cham, Switzerland, 2017)
4. Ojaroudiparchin, N., Shen, M., Pedersen, G.F.: ‘Multi-layer 5G mobile phone antenna for multi-user MIMO communications’. *Proc. 23rd Telecommun. Forum Telfor (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, November 2015, pp. 559–562
5. Ojaroudi Parchin, N., Jahanbakhsh Basherlou, H., Al-Yasir, Y., et al.: ‘Recent developments of reconfigurable antennas for current and future wireless communication systems’, *Electronics.*, 2019, 8, (2), pp. 1–17
6. Al-Yasir, Y., Abdullah, A., Ojaroudi Parchin, N., et al.: ‘A new polarizationreconfigurable antenna for 5G applications’, *Electronics*, 2018, 7, pp. 1–11
7. Hussain, R., Alreshaid, A.T., Podilchak, S.K., et al.: ‘Compact 4G MIMO antenna integrated with a 5G array for current and future mobile handsets’, *IET Microw. Antennas Propag.*, 2017, 11, pp. 271–279
8. Ojaroudiparchin, N., Shen, M., Pedersen, J.F., et al.: ‘UWB mm-wave antenna array with quasi omnidirectional beams for 5G handheld devices’. *IEEE Int. Conf. on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*, Nanjing, China, October 2016, pp. 1–4
9. Chen, Q., Lin, H., Wang, J., et al.: ‘Single ring slot based antennas for metalrimmed 4G/5G smartphones’, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2019, 67, (3), pp. 1476–1487
10. Ojaroudiparchin, N., Shen, M., Pedersen, J.F., et al.: ‘Wide-scan phased array antenna fed by coax-to- microstriplines for 5G cell phones’. *21st Int. Conf. On Microwaves, Radar and Wireless Communications*, Krakow, Poland, May 2016, pp. 1–

11. Al-Hadi, A.A., Ilvonen, J., Valkonen, R., et al.: 'Eight-element antenna array for diversity and MIMO mobile terminal in LTE 3500 MHz band', *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2014, 56, (6), pp. 1323–1327
12. Xu, S., Zhang, M., Wen, H., et al.: 'Deep-subwavelength decoupling for MIMO antennas in mobile handsets with singular medium', *Sci. Rep.*, 2017, 7:12162, pp. 1–9
13. Zhao, A., Zhouyou, R.: 'Size reduction of self-isolated MIMO antenna system for 5G mobile phone applications', *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2019, 18, pp. 152–156
14. Sun, L., Feng, H., Li, Y., et al.: 'Compact 5G MIMO mobile phone antennas with tightly arranged orthogonal-mode pairs', *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2018, 66, (11), pp. 6364–6369
15. Li, M.-Y.: 'Eight-port orthogonally dual-polarised MIMO antennas using loop structures for 5G smartphone', *IET Microw. Antennas Propag.*, 2017, 11, (12), pp. 1810–1816
16. Parchin, N.O., Al-Yasir, Y.I. A., Ali, A.H., et al.: 'Eight-element dualpolarized MIMO slot antenna system for 5G smartphone applications', *IEEE. Access.*, 2019, 9, pp. 15612–15622
17. Li, M.-Y., Ban, Y.-L., Xu, Z.-Q., et al.: 'Tri-polarized 12-antenna MIMO array for future 5G smartphone applications', *IEEE. Access.*, 2018, 6, pp. 6160–6170
18. Abdullah, M., Ban, Y.-L., Kang, K., et al.: 'Eight-element antenna array at 3.5 GHz for MIMO wireless application', *Progr Electromagn Res C*, 2017, 78, pp. 209–217
19. Zhao, X., Yeo, S.P., Ong, L.C.: 'Decoupling of inverted-F antennas with highorder modes of ground plane for 5G mobile MIMO platform', *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2018, 66, (9), pp. 4485–4495
20. Wong, K.-L., Lu, J.-Y., Chen, L.-Y., et al.: '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', *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2016, 58, (1), pp. 174–181

21. Parchin, N.O., Al-Yasir, Y.I.A., Noras, J.M., et al.: ‘Dual-polarized MIMO antenna array design using miniaturized self-complementary structures for 5G smartphone applications’. 13th European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP 2019), Krakow, Poland, 31 March-5 April 2019, pp. 1–4
22. Li, M.-Y., Ban, Y.-L., Xu, Z.-Q., et al.: ‘Eight-port orthogonally dualpolarized antenna array for 5G smartphone applications’, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2016, 64, (9), pp. 3820–3830
23. Ojaroudi Parchin, N., Jahanbakhsh Basherlou, H., Al-Yasir, Y.I.A., et al.: ‘Multi-band MIMO antenna design with user-impact investigation for 4G and 5G mobile terminals’, *Sensors*, 2019, 19, (3), pp. 1–16
24. Statement: Improving Consumer Access to Mobile Services at 3.6 GHz to 3.8 GHz.: Available at. <https://www.ofcom.org.uk/consultations-and-statements/category-1/future-use-at-3.6-3.8-ghz>, accessed on 21 October 2018
25. Ojaroudiparchin, N., Shen, M., Zhang, S., et al.: ‘A switchable 3-D-coveragephased array antenna package for 5G mobile terminals’, *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2016, 15, pp. 1747–1750
26. Yoshimura, Y.: ‘A microstripline slot antenna’, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1972, 20, (11), pp. 760–762
27. CST Microwave Studio; ver. 2017; CST: Framingham, MA, USA, 2017
28. Elfergani, I.T.E., Hussaini, A.S., Rodriguez, J., et al.: ‘Antenna fundamentals for legacy mobile applications and beyond’ (Springer International, Cham, Switzerland, 2017), pp. 1–659
29. Ojaroudi, N., Ojaroudi, Y., Ojaroudi, S.: ‘Compact ultra-wideband monopole antenna with enhanced bandwidth and dual band-stop properties’, *Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng.*, 2015, 25, (4), pp. 346–357
30. Al-Nuaimi, M.K.T., Whittow, W.G.: ‘Performance investigation of a dual element IFA array at 3 GHz for MIMO terminals’. *Antennas and Propagation Conf. (LAPC)*, Loughborough, UK, November 2011, pp. 1–5
31. Ojaroudi Parchin, N., Alibakhshikenari, M., Jahanbakhsh Basherlou, H., et al.: ‘MM-wave phased array quasi-Yagi antenna for the upcoming 5G cellular communications’, *Appl. Sci.*, 2019, 9, (5), pp. 1–14

32. Ojaroudi Parchin, N., Jahanbakhsh Basherlou, H., Abd-Alhameed, R., et al.: 'Dual-band monopole antenna for RFID applications', *Fut. Internet*, 2019, 11, pp. 1–10
33. Mazloun, J., Ghorashi, S.A., Ojaroudi, M., et al.: 'Compact triple-band Sshaped monopole diversity antenna for MIMO applications', *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, 2015, 30, (9), pp. 975–980
34. Sharawi, M.S.: 'Printed multi-band MIMO antenna systems and their performance metrics [wireless corner]', *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 2013, 55, (5), pp. 218–232
35. Islam, S.N., Kumar, M., Sen, G., et al.: 'Design of a compact triple band antenna with independent frequency tuning for MIMO applications', *Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng.*, 2019, 29, (3), pp. 1–10
36. Ali, W.A.E., Ibrahim, A.A.: 'A compact double-sided MIMO antenna with an improved isolation for UWB applications', *AEU Int. J. Electron Commun.*, 2017, 82, pp. 7–13
37. Li, Y., Zou, H., Wang, M., et al.: 'Eight-element MIMO antenna array for 5G/sub-6 GHz indoor micro wireless access points'. *Proc. Int. Workshop Antenna Technol. (iWAT)*, Nanjing, China, March 2018, pp. 1–4
38. Ojaroudiparchin, N., Shen, M., Pedersen, G.F.: 'Small-size tapered slot antenna (TSA) design for use in 5G phased array applications', *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, 2018, 32, (3), pp. 193–202
39. Syrytsin, I., Zhang, S., Pedersen, G.F.: 'Performance investigation of a mobile terminal phased array with user effects at 3.5 GHz for LTE advanced', *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2017, 16, pp. 1847–1850
40. Moustafa, J., McEwan, N.J., Abd-Alhameed, R.A., et al.: 'Low SAR phased antenna array for mobile handsets', *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, 2006, 21, (3), pp. 196–205
41. Iqbal, A., Saraereh, O.A., Ahmad, A.W., et al.: 'Mutual coupling reduction using F-shaped stubs in UWB-MIMO antenna', *IEEE Access.*, 2018, 6, pp. 2755–2759

42. Ojaroudi Parchin, N., Jahanbakhsh Basherlou, H., Alibakhshikenari, M., et al.: 'Mobile-phone antenna array with diamond-ring slot elements for 5G massive MIMO systems', *Electronics*. (Basel), 2019, 8, (5), pp. 1–17
43. Rappaport, T.S., Shu Sun Mayzus, R., et al.: 'Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work!', *IEEE Access*, 2013, 1, pp. 335–349
44. Ojaroudiparchin, N., Shen, M., Pedersen, G.F.: 'A 28 GHz FR-4 compatible phased array antenna for 5G mobile phone applications'. *IEEE Int. Symp. In Antennas and Propagation (ISAP)*, Hobart, TAS, Australia, November 2015, pp. 1–4
45. Wang, Y., Li, J., Huang, L., et al.: '5G mobile: Spectrum broadening to higher-frequency bands to support high data rates', *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 2014, 9, (3), pp. 39–46
46. Hong, W., Beak, K., Lee, Y., et al.: 'Design and analysis of a low-profile 28 GHz beam steering antenna solution for future 5G cellular applications'. *IEEE Int. Microwave Symp.*, Tampa Bay, FL, USA, June 2014, pp. 1–4
47. Ek, S., Pahlsson, T., Elgaard, C., et al.: 'A 28-nm FD-SOI 115-fs jitter PLLbased LO system for 24–30-GHz sliding-IF 5G transceivers', *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2018, 53, (7), pp. 1988–2000
48. Bai, T., Heath, R.: 'Coverage and rate analysis for millimeter wave cellular networks', *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, 2015, 14, (2), pp. 1110–1114
49. Ojaroudiparchin, N., Shen, M., Pedersen, G.F.: 'Design of vivaldi antenna array with end-fire beam steering function for 5G mobile terminals'. *Telecommunications Forum (TELFOR 2015)*, Belgrade, Serbia, November 2015, pp. 587–590
50. Ojaroudiparchin, N., Shen, M., Pederson, G.F., et al.: 'Beam-steerable microstrip-fed bow-tie antenna array for fifth generation cellular communications'. *European Conf. on Antennas and Propagation (EuCAP 2019)*, Davos, Switzerland, April 2016, pp. 1–5

ДОДАТОК А

УДК 637.5.02

DOI:

МІШАН В.В.
ORCID ID: 0000-0002-2771-7285
Хмельницький національний університет
v_mishan@ukr.net
КАРПОВА Л.В.
Хмельницький національний університет
ORCID ID: 0000-0001-5015-2107
e-mail: rtlesya@gmail.com
ЛОБАЧОВА І.В.
Хмельницький національний університет
innabazilyk@gmail.com

АНТЕННА РЕШІТКА МІМО З РОЗНЕСЕННЯМ ДІАГРАМ СПРЯМОВАНОСТІ ДЛЯ СМАРТФОНІВ 5G

В роботі представлено конструкцію антени МІМО для смартфонів. Для антенної решітки смартфона було отримано хорошу смугу частот ($S_{11} \leq -10$ дБ) 3,3 – 3,9 ГГц. Тим не менш, для $S_{11} \leq -6$ дБ це значення становить 3,1 – 4,3 ГГц. Для одноелементного випромінювача досягнуто більше 3 дБ реалізованого підсилення та 80% загальної ефективності. Конструкція забезпечує не тільки достатнє покриття випромінюванням, що підтримує різні сторони материнської плати, але й різноманітність поляризації. Крім того, хороші властивості отримані поблизу людини-руки/людини-голови. Запропонована конструкція антени МІМО також здатна генерувати дво- або багатодіапазонну функцію.

Ключові слова: антена МІМО, діаграма спрямованості, фазована решітка, поляризація, смуга пропускання, 5G смартфони.

MISHAN Viktor V., KARPOVA Lesia V., LOBACHOVA Inna V.
Khmelnitsky National University

MIMO ANTENNA ARRAY WITH DIRECTIONAL DIAGRAM SPREAD FOR 5G SMARTPHONES

Multiple-input/multiple-output technology can exponentially increase the data transfer rate and spectrum efficiency without any need of increasing the transmission power and bandwidth. It is the most promising technology to be used in the upcoming 5G communications. To be more accurate, the fourth generation smartphones are set to use the long-term evolution MIMO technology and operate in multi-bands. Therefore, MIMO antennas are to use in future portable devices such as mobile handsets and tablets. A new multiple-input/multiple-output (MIMO) antenna design is introduced for future smartphones. The proposed design contains four pairs of double-fed circular-ring resonators located at different edges of the smartphone printed circuit board (PCB) with an FR-4 substrate and a dimension of 75×150 mm². The antenna elements are fed by 50-Ohm microstriplines and provide polarisation and radiation pattern diversity function due to the orthogonal placement of their feed lines. By inserting a rectangular slot under each microstrip feed-line, the mutual coupling characteristic of the antenna ports is reduced. A good frequency bandwidth ($S_{11} \leq -10$ dB) of 3.3–3.9 GHz has been obtained for the smartphone antenna array. Nevertheless, for $S_{11} \leq -6$ dB, this value is 3.1–4.3 GHz. More than 3 dB realised gain and 80% total efficiency are achieved for the singleelement radiator. The design provides not only sufficient radiation coverage supporting different sides of the mainboard but also the polarisation diversity. In addition, sufficient properties are obtained in the vicinity of human-hand/human-head. The proposed MIMO antenna design is also capable to generate dual- or multi-band function. Moreover, a new and compact phased array millimeter-wave (mm-wave) antenna design with end-fire radiation beams is introduced which can be easily integrated into smartphones.

Keywords: multiple-input/multiple-output MIMO antenna, beam pattern, phased array, polarization, bandwidth, 5G smartphones.

Вступ

Технологія множинних входів/множинних виходів (MIMO) може експоненціально збільшити швидкість передачі даних і ефективність використання спектра без необхідності збільшення потужності передачі та пропускної здатності [1]. Це найперспективніша технологія, яка буде використовуватися в майбутньому зв'язку 5G. Щоб бути більш точним, смартфони четвертого покоління (4G) налаштовані використовувати довгострокову еволюцію технології MIMO та працювати в кількох діапазонах. Тому антени MIMO повинні використовуватися в майбутніх портативних пристроях, таких як мобільні телефони та планшети [2].

Згідно з вимогами стільникового зв'язку, низькопрофільні, широкопasmові антенні елементи з достатнім взаємним зв'язком є нагальною потребою в терміналах 5G для портативних пристроїв [3]. Оскільки простір портативного пристрою обмежений, конфігурацію кількох антен важко встановити в такому обмеженому пристрої [4]. Таким чином, інтеграція кількох елементів антени в мобільний телефон є новим викликом. Нещодавно було запропоновано декілька типів MIMO антен для мобільних терміналів нижче 6 ГГц [5]. Ці конструкції антен для смартфонів або мають вузький робочий діапазон, використовують випромінювачі з одним живленням/одною поляризацією, або використовують одноплосинні структури, які займають багато місця на друкованій платі смартфона і призводять до збільшення складності системи.

У [5] для використання в мобільних терміналах запропоновано неплоскі антенні решітки з вузькими смугами пропускання імпедансу (< 200 МГц). Однак, оскільки конфігурація використовуваних елементів не є плоскою, реалізація цього типу антен є серйозною проблемою. У цьому дослідженні представлено конструкцію антени смартфона MIMO з компактними випромінювальними елементами, високою ефективністю та широкою смугою пропускання для додатків 5G з частотою 3,6 ГГц. Частота 3,6 ГГц є однією із смуг-кандидатів для комерційних мобільних мереж 5G частотою 6 ГГц. Чотири випромінювальні елементи антени з подвійним живленням/різною поляризацією з круглим кільцем/щілиною розміщені в різних кутах плати смартфона для демонстрації ортогональної поляризації з діаграмою спрямованості та різноманітням поляризації. В результаті антена MIMO забезпечує не тільки повне покриття випромінюванням, але й поляризаційне різноманіття для кожної сторони друкованої плати.

Конфігурація антенного елемента складається з компактного круглокольцевого щілинного випромінювача з парою мікросмужкових живильних ліній. Щоб зменшити характеристику взаємного зв'язку портів, під кожною мікросмужковою лінією живлення була вирізана прямокутна щілина. Вона забезпечує досить хорошу смугу пропускання імпедансу (в межах 600 МГц для $S_{11} < -10$ дБ) і низький взаємний зв'язок, кращий за -15 дБ. На відміну від нещодавно представлених конструкцій антен MIMO [5], представлена конструкція демонструє ширшу смугу пропускання імпедансу та нижчу функцію коефіцієнта кореляції огинаючої (ECC). Висока ізоляція (18 дБ), висока ефективність (60–80%), широка смуга пропускання (600 МГц) і властивості подвійної поляризації були досягнуті для запропонованої конструкції. Крім того, розрахований загальний коефіцієнт активного відбиття (TARC) і властивості коефіцієнта кореляції огинаючої конструкції MIMO, який є дуже низькими ($< 0,001$ і -20 дБ) у всьому діапазоні інтересів (особливо на резонансній частоті 3,6 ГГц), що підтверджує здатність представленої системи антени смартфона для прийому/передачі рознесеного прийому/передачі в каналах MIMO.

Виклад основного матеріалу

Конфігурація розробленої подвійної поляризованої круглої кільцевої антени проілюстрована на рис. 1. Вона розроблена на діелектрику FR-4 діаметром 1,6 мм ($\epsilon = 4,4$ і $\delta = 0,025$) для роботи на частоті 3,6 ГГц. Конфігурація антени містить пару мікросмужкових ліній живлення разом із кільцевим щілинним випромінювачем у заземленій площині. Крім того, пара прямокутних прорізів була вставлена в задній шар (площина заземлення), щоб зменшити характеристику зв'язку портів антени.

Конфігурації та результати S-параметрів щілинної антени з круглим кільцем, антени з щілинним випромінювачем із круглим кільцем і остаточної конструкції проілюстровано та порівняно на рис. 2а-в відповідно. Як показано на рис. 2, резонанс подвійної поляризованої антени з круглим щілинним випромінювачем відбувається на частоті 7 ГГц, а завдяки перетворенню її на кругле кільце розмір резонатора збільшується, і антена резонує приблизно на 4 ГГц. Нарешті, використовуючи представлену конструкцію,

показану на рис. 2в, антена демонструє хороше узгодження імпедансу з широкою смугою пропускання та характеристиками високої ізоляції в потрібному діапазоні.

З отриманих результатів зрозуміло, що для $S_{11} \leq -6$ дБ і $S_{11} \leq -10$ дБ одноелементна антена забезпечує смугу пропускання $> 1,2$ і $0,5$ ГГц відповідно. Крім того, характеристика взаємного зв'язку двопортової конструкції становить < -20 дБ на резонансній частоті антени (3,6 ГГц).

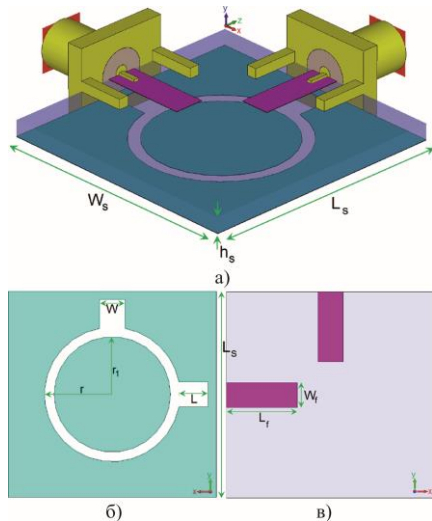


Рис. 1. Геометрія одноелементної антени
а) – прозорий вигляд; б) – нижній шар; в) – верхній шар

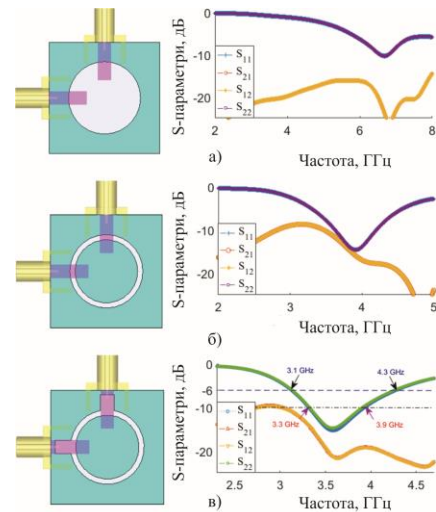


Рис. 2. Різні конфігурації та S-параметри для конструкції антени: а) кругова; б) кругова кільцева; в) пропонуванний щілинний радіатор

Щільність струму в задньому шарі антени, а також тривимірні (3D) діаграми спрямованості на робочій частоті (3,6 ГГц) від кожного порту показано на рис. 3. Як видно, струми в основному розподіляються навколо щілинно-кільцевого радіатора. Як можна помітити, для різних портів живлення антени струми течуть у протилежних напрямках завдяки функції рознесення двопортової конструкції. Крім того, використовувані прямокутні слоти виглядають дуже активними з високою щільністю на частоті 3,6 ГГц. Також можна побачити, що для кожного порту живлення: антена пропонує подібні діаграми спрямованості з реалізованим підсиленням > 3 дБ і різними поляризаціями від портів живлення.

Основні характеристики випромінювання, включаючи випромінювання/загальну ефективність, максимальне підсилення та спрямованість у робочому діапазоні антени, показані на рис. 4. Як показано на рис. 4а, антена забезпечує дуже високу ефективність через низький взаємний зв'язок. У всьому робочому діапазоні було досягнуто більш ніж 80% ефективності. Крім того, антена має ефективність $> 90\%$ на робочій частоті (3,6 ГГц). Відповідно до отриманих результатів на рис. 4б, антена забезпечує майже постійну спрямованість і максимальні характеристики підсилення в смузі пропускання 600 МГц. Для антени досягнуто близько 3,5 дБі спрямованості та 3 дБі максимального підсилення.

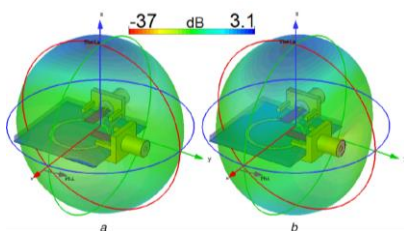


Рис. 3. Щільність струму та 3D діаграми спрямованості на частоті 3,6 ГГц

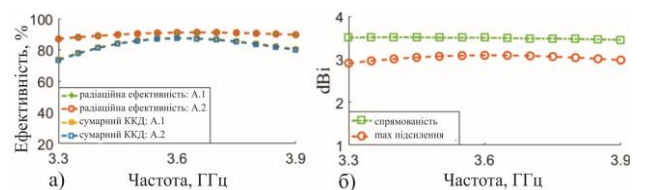


Рис. 4. Основні властивості рознесеної антени з подвійною поляризацією: а) ефективність антени (ККД); б) спрямованість і максимальне підсилення

На рис. 5 показані тривимірні діаграми спрямованості антен 1 і 2 на частоті 3,6 ГГц, у яких елементи антени мають квазівсеспрямовану діаграму спрямованості, яка в основному охоплює верхню та нижню сторони

друкованої плати смартфона. Завдяки цьому кільцеподібна антена є хорошим вибором для використання в конструкції антени смартфона порівняно з іншими мікросмушковими антенами, такими як патч-антена, диполь та антена Yagi. Крім того, елементи антени є мініатюрними та забезпечують подвійне живлення/функцію подвійної поляризації. Таким чином, антена смартфона показала хороше покриття випромінюванням, а поляризаційне різноманіття підтверджує її потенціал для майбутніх додатків смартфонів.

Як видно з рис. 5, випромінювачі антени з подібною поляризацією та розміщенням демонструють подібні діаграми спрямованості. Таким чином, для виготовленого прототипу були виміряні діаграми спрямованості одноелементних/подвійних резонаторів для антен 1 і 2 на резонансній частоті (3,6 ГГц). Змодельовані та виміряні 2D полярні діаграми спрямованості проілюстровано на рис. 6. Як показано, конструкція демонструє хороші діаграми спрямованості. Крім того, елементи антени демонструють підсилення IEEE близько 5 дБі в центральній робочій смузі.

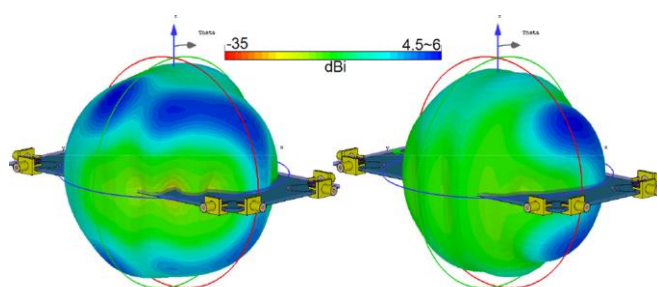


Рис. 5. Тривимірні діаграми спрямованості конструкції смартфона 5G

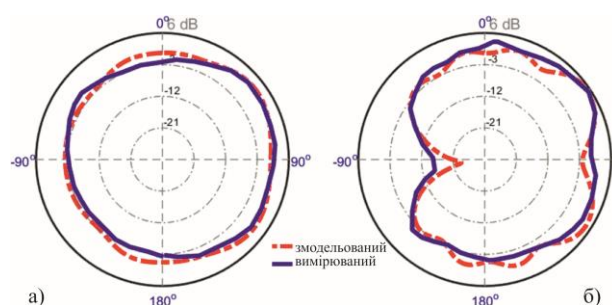


Рис. 6. Виміряні та змодельовані діаграми спрямованості полярного випромінювання на частоті 3,6 ГГц для: а) ант.1; б) ант.2

Для того, щоб переконатися, що антена є компетентною для рознесення в каналах MIMO, ECC і TARC є два важливі параметри, які слід досліджувати. Характеристики ECC і TARC антени MIMO можна розрахувати за результатами S-параметрів за допомогою наведених нижче формул

$$ECC = \frac{|S_{mm}^* S_{mn} + S_{nm}^* S_{nn}|^2}{(1 - |S_{mm}|^2 - |S_{mn}|^2)(1 - |S_{nm}|^2 - |S_{nn}|^2)^*} \quad (1)$$

$$TARC = \sqrt{\frac{(S_{mm} + S_{mn})^2 + (S_{nm} + S_{nn})^2}{2}} \quad (2)$$

Іншим важливим параметром для оцінки продуктивності MIMO багатоантенної конструкції є втрати в каналі, які утворюються в результаті взаємної кореляції елементів антени в системах MIMO. Рівень зниження продуктивності системи можна визначити втратою ємності. Втрата ємності системи MIMO в основному залежить від S-параметрів. Втрати в каналі системи 8×8 MIMO можна розрахувати за допомогою формул:

$$CL = -\log_2 \det(\Psi^R), \quad (3)$$

$$\Psi^R = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \cdots & \rho_{18} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{81} & \cdots & \rho_{88} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де $\rho_{ii} = 1 - (|S_{ii}|^2 + |S_{ij}|^2)$; $\rho_{ij} = -(S_{ii}^* S_{ij} + S_{ji}^* S_{ij})$ для $i, j = 1, \dots, 8$

Слід зазначити, що прийнята межа втрат пропускної здатності каналу (CCL) становить $\leq 0,4$ біт/с/Гц. Як видно з рис. 7а, запропонована конструкція MIMO має дуже низький CCL у всьому робочому діапазоні: для системи MIMO досягається $< 0,4$ біт/с/Гц у діапазоні частот 3,3–3,9 ГГц. Для подальшого дослідження продуктивності MIMO запропонованої системи антени смартфона розрахована пропускна здатність каналу (CC) показана на рис. 7б. Пропускна здатність каналу можна визначити наступним чином:

$$CC = E \left\{ \log_2 \left[\det \left(I + \frac{SNR}{n_T} \right) H_{scale} H_{scale}^T \right] \right\}, \quad (5)$$

а матрицю каналу H_{scale} можна розрахувати наступним чином:

$$H_{scale} = \sqrt{\rho_{scale,RX}} H_{i.i.d} \sqrt{\rho_{scale,TX}} \quad (6)$$

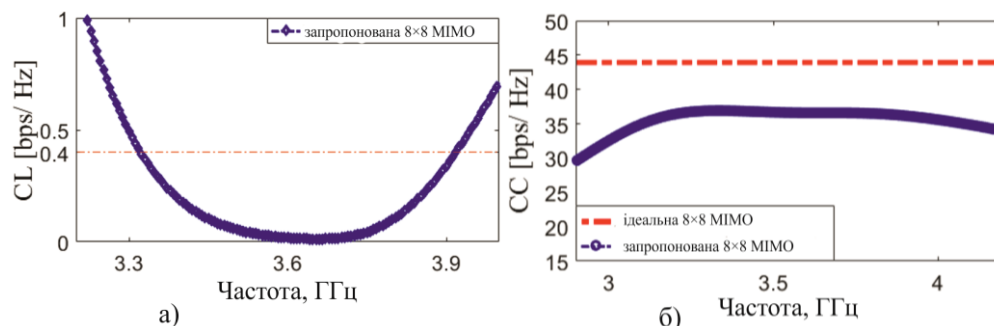


Рис. 7. Розрахункова продуктивність каналу: а) СС; б) СЛ

Як видно з рис. 7б, розрахована пропускна здатність каналу СС запропонованої конструкції в межах бажаного діапазону частот є кращою, ніж 35 біт/с/Гц, тоді як для ідеального випадку це значення становить 44 біт/с/Гц. Отже, запропонована конструкція забезпечує кращі характеристики з точки зору ефективності, ізоляції та ЕСС. Крім того, вона забезпечує ширшу смугу частот 3,3–3,9 ГГц (600 МГц) із функцією рознесення, що підтримує обидві сторони материнської плати.

Висновок

Представлено нову конструкцію антени МІМО з випромінювачами з ортогональною подвійною поляризацією для смартфонів 5G. Її конфігурація використовує вісім портів/чотири випромінювачі модифікованих круглих кільцевих випромінювачів, розташованих на чотирьох краях материнської плати мобільного телефону. Частота роботи випромінювачів становить від 3,3 до 3,9 ГГц з резонансом 3,6 ГГц. Досліджуються базові властивості конструкції антени смартфона, включаючи S-параметр, ефективність, діаграми спрямованості, результати ЕСС і TARC. Результати показали, що антена має достатні характеристики, що відповідають вимогам для використання в мобільних телефонах 5G. Використовуючи нову техніку живлення, запропонована антенна решітка смартфона також може генерувати дво- або багатодіапазонну характеристику.

Література

1. Nadeem, Q.-U.-A., Kammoun, A., Debbah, M., et al.: 'Design of 5G full dimension massive MIMO systems', IEEE Trans. Commun., 2018, 66, pp. 726–740
2. Ojaroudi Parchin, N., Jahanbakhsh Basherlou, H., Al-Yasir, Y., et al.: 'Recent developments of reconfigurable antennas for current and future wireless communication systems', Electronics., 2019, 8, (2), pp. 1–17
3. Chen, Q., Lin, H., Wang, J., et al.: 'Single ring slot based antennas for metalrimmed 4G/5G smartphones', IEEE Trans. Antennas Propag., 2019, 67, (3), pp. 1476–1487
4. Al-Hadi, A.A., Ilvonen, J., Valkonen, R., et al.: 'Eight-element antenna array for diversity and MIMO mobile terminal in LTE 3500 MHz band', Microw. Opt. Technol. Lett., 2014, 56, (6), pp. 1323–1327
5. Li, M.-Y.: 'Eight-port orthogonally dual-polarised MIMO antennas using loop structures for 5G smartphone', IET Microw. Antennas Propag., 2017, 11, (12), pp. 1810–1816

References

1. Nadeem, Q.-U.-A., Kammoun, A., Debbah, M., et al.: 'Design of 5G full dimension massive MIMO systems', IEEE Trans. Commun., 2018, 66, pp. 726–740

2. Ojaroudi Parchin, N., Jahanbakhsh Basherlou, H., Al-Yasir, Y., et al.: 'Recent developments of reconfigurable antennas for current and future wireless communication systems', *Electronics.*, 2019, 8, (2), pp. 1–17
3. Chen, Q., Lin, H., Wang, J., et al.: 'Single ring slot based antennas for metalrimmed 4G/5G smartphones', *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2019, 67, (3), pp. 1476–1487
4. Al-Hadi, A.A., Ilvonen, J., Valkonen, R., et al.: 'Eight-element antenna array for diversity and MIMO mobile terminal in LTE 3500 MHz band', *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 2014, 56, (6), pp. 1323–1327
5. Li, M.-Y.: 'Eight-port orthogonally dual-polarised MIMO antennas using loop structures for 5G smartphone', *IET Microw. Antennas Propag.*, 2017, 11, (12), pp. 1810–1816

Надійшла / Paper received : заповнюється редакцією

Надрукована/Printed : заповнюється редакцією

Рецензент – д.т.н., професор кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій ХНУ, Ю. М. Бойко

ДОВІДКА № 11/22-6

Затверджує те, що стаття «**Антенна решітка МІМО з рознесенням діаграм спрямованості для смартфонів 5g^o**» авторів Мішан В.В., Карпова Л.В., Лобачова І.В. Хмельницький національний університет) – прийнята до опублікування у науковому журналі "Вісник Хмельницького національного університету" № 6 за 2022 р., серія "Технічні науки", який включено до наукометричних баз (Index Copernicus, Google Scholar) та затверджений як фахове видання Постановою президії ВАК України від 28.125.2019 № 1643

Начальник відділу
інтелектуальної власності та трансферу технологій,
відповідальний секретар Вісника ХНУ



Ю. В. Кравчик

ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Магістерська дипломна робота**СИНТЕЗ АНТЕННОЇ
РОЗНЕСЕНОЇ МІМО-РЕШІТКИ
ДЛЯ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ 5G**

Виконала:
студентка групи ТРм-21-1
Інна ЛОБАЧОВА

Науковий керівник:
кандидат техн. наук, доцент
Віктор МІШАН



MIMO або **Multiple Input Multiple Output** – це технологія антени в **5G LTE**, яка використовує кілька антенних елементів на передавачі та приймачі для покращення якості сигналу та швидкості передачі даних.



Технічне завдання

Актуальність роботи полягає у аналізі методів множинних входів/множинних виходів МІМО.

Мета роботи: аналіз методів множинного доступу в бездротовому зв'язку для передачі даних від одного пристрою до іншого через радіоресурси

Об'єкт дослідження: перспективи застосування міліметрових хвиль для мережі 5G

Предмет дослідження: аналіз методів використання мобільного та бездротового зв'язку в інформаційному суспільстві

3



Наукова новизна отриманих результатів

- представлено нову конструкцію антени МІМО для смартфонів майбутнього

Практичне значення отриманих результатів:

- проведено аналіз методів використання мобільного та бездротового зв'язку в інформаційному суспільстві;
- досліджено фундаментальні властивості конструкції антени смартфона, включаючи S-параметр, ефективність, діаграми спрямованості, результати ECC і TARC;
- представлено конструкцію антени смартфона МІМО з компактними випромінювальними елементами, високою ефективністю та широкою смугою пропускання 3,6 ГГц;
- наведені характеристики антени в присутності користувача

Апробація



4



Смуги частот



Spectrum determines 5G coverage and speed

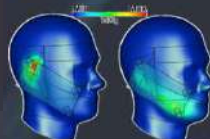
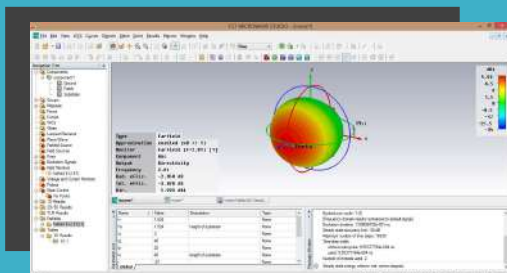


5



5G – технологічні виклики

- Сучасна система LTE працює з більш ніж 50 діапазонами частот, які знаходяться нижче 3,6 ГГц.
- Одним із частот-кандидатів для раннього розгортання 5G є діапазон нижче 6 ГГц.
- Неліцензований спектр нижче 6 ГГц (600 МГц і між 3,5 ГГц і 6 ГГц) буде використовуватися для першого покоління мереж 5G.
- 5G NR - Новий радіостандарт для мереж 5G – це набір частотних діапазонів у діапазоні нижче 6 ГГц і міліметрових хвиль РЧ-спектру.
- Конструкція обладнання на міліметрових хвилях набагато складніше, ніж на низькочастотному діапазоні.



CST STUDIO SUITE:

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ
МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО
ПОЛЯ

6



Одноэлементна/двополярна антена

діелектрик FR-4
діаметром 1,6 мм
($\epsilon = 4,4$ і $\delta = 0,025$)
для роботи на
частоті 3,6 ГГц.

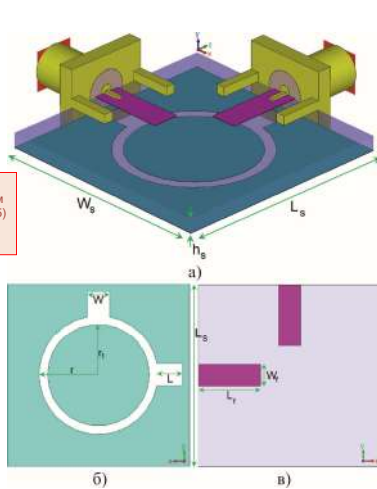


Рис. 1 – Геометрія одноелементної антени
а) – прозорий вигляд; б) – нижній шар; в) – верхній шар

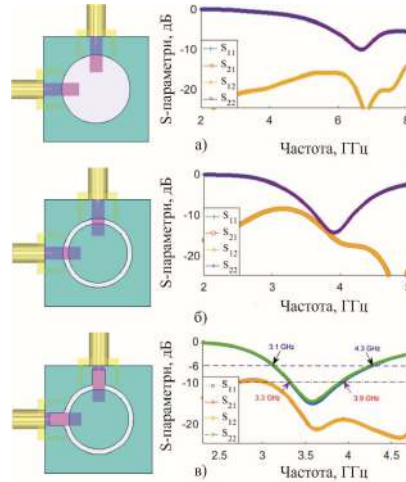


Рис. 2 – Різні конфігурації та S-параметри для
конструкції антени: а) кругова; б) кругова кільцева;
в) пропонуванний щільний радіатор

- ✓ Резонанс подвійної поляризованої антени з круглим щільним випромінювачем відбувається на частоті 7 ГГц, а завдяки перетворенню її на кругле кільце розмір резонатора збільшується, і антена резонує приблизно на 4 ГГц.
- ✓ Конструкція даної антени демонструє добре узгодження імпедансу з широкою смугою пропускання та характеристиками високої ізоляції в потрібному діапазоні.
- ✓ З отриманих результатів зрозуміло, що для $S_{11} \leq -6$ дБ і $S_{11} \leq -10$ дБ одноелементна антена забезпечує смугу пропускання $> 1,2$ і $0,5$ ГГц.
- ✓ Характеристика взаємного зв'язку двоходової конструкції становить < -20 дБ на резонансній частоті антени 3,6 ГГц.

Результати S-параметрів (S_{11} і S_{21}) для змінних параметрів конструкції

$r-r_1$ – вплив ширини круглого кільця

на робочу смугу за таких умов: коли її розмір змінюється від 0,5 до 2 мм, частотний резонанс конструкції змінюється від 3,1 до 4 ГГц.

L – зміна довжини вбудованого прямокутного слота

частотний резонанс налаштовується на нижні або верхні частоті (без будь-яких змін у його взаємному зв'язку та частотній смузі)

W – збільшення ширини прямокутної щілини

шляхом збільшення ширини прямокутної щілини, таким чином можна покращити смугу пропускання антени та її ізоляцію, особливо в її нижній смузі

r – характеристики S-параметрів антени для різних розмірів щільного випромінювача

різні значення впливають на смугу пропускання антени та ізоляцію

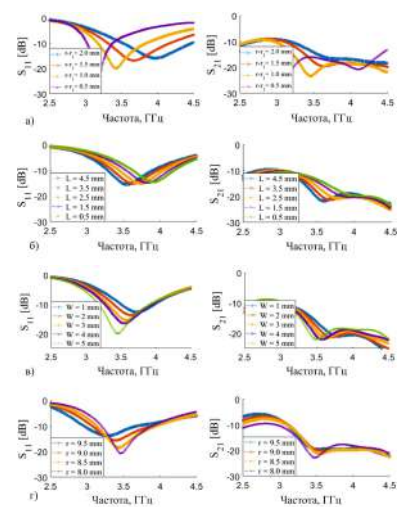


Рис. 1 – Результати S_{11} і S_{21} антени для різних значень
а) $r-r_1$, б) r , в) W , г) L

Характеристики антени

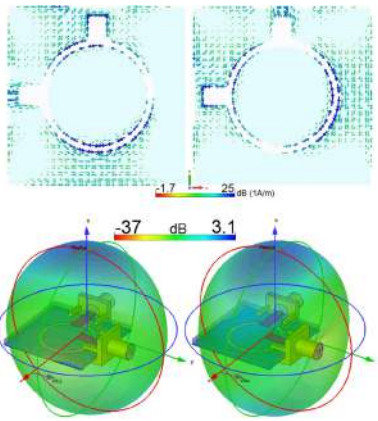
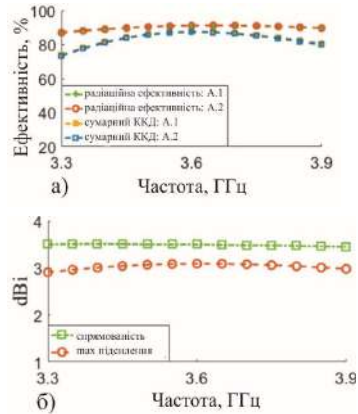


Рис. 1 – Щільність струму та 3D діаграми спрямованості на частоті 3,6 ГГц

Основні характеристики випромінювання, включаючи випромінювання/загальну ефективність, максимальне підсилення та спрямованість у робочому діапазоні антени



Ефективність антени (ККД)

- У всьому робочому діапазоні було досягнуто більш ніж 80% ефективності
- антена має ефективність > 90% на робочій частоті 3,6 ГГц

Спрямованість і максимаотне підсилення

- антена забезпечує майже постійну спрямованість і максимальні характеристики підсилення в смузі пропускання 600 МГц.
- Для антени досягнуто близько 3,5 дБі спрямованості та 3 дБі максимального підсилення.

Рис. 2 – Основні властивості рознесеної антени з подвійною поляризацією

Конструкція антени МІМО для смартфона 5G

на підкладці FR4 (з деталіми с. 4,4 і б. 0,025) розмір 75 × 150 × 1,6 мм³

Рис. 1 – Конструкція МІМО для смартфонів 5G: а) верхній шар, б) нижній шар

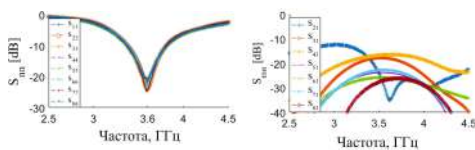


Рис. 2 – Змодельовані S-параметри

Тривимірна діаграма спрямованості

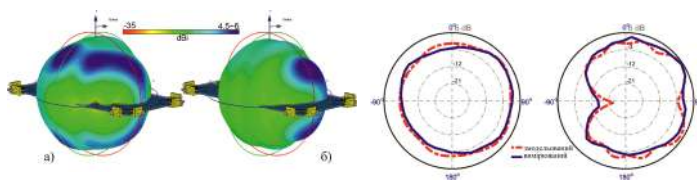


Рис. 3 – Тривимірні діаграми спрямованості від а) Порт 1, б) Порт 2

Рис. 5 – Діаграми спрямованості полярного випромінювання на частоті 3,6 ГГц

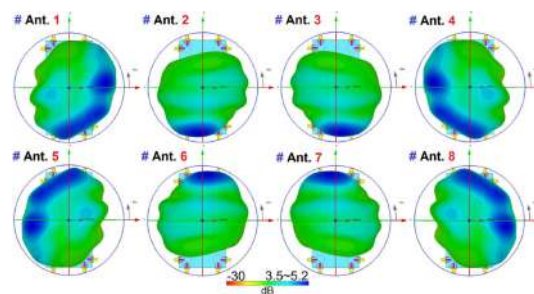


Рис. 4 – Шаблони тривимірних масивів конструкцій смартфона 5G

Характеристики досліджуваної конструкції

- MIMO** Multiple-input and multiple-output з декількома входами та декількома виходами
- TARC** Total active reflection coefficient загальний коефіцієнт активного відбиття
- ECC** Envelope correlation coefficient коефіцієнт кореляції обвідної

$$ECC = \frac{|S_{mm}^* S_{mn} + S_{nm}^* S_{nn}|^2}{(1 - |S_{mm}|^2 - |S_{nn}|^2)(1 - |S_{nm}|^2 - |S_{mn}|^2)^*} \quad (1)$$

$$TARC = \sqrt{\frac{(S_{mm} + S_{nn})^2 + (S_{nm} + S_{mn})^2}{2}} \quad (2)$$

Втрати в каналі системи 8 × 8 MIMO

$$CL = -\log_2 \det(\Psi^R) \quad (3)$$

$$\Psi^R = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \dots & \rho_{18} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{81} & \dots & \rho_{88} \end{bmatrix} \quad \text{де } \rho_{ii} = 1 - (|S_{ii}|^2 + |S_{ij}|^2) \\ \rho_{ij} = -(S_{ij}^* S_{ij} + S_{ji}^* S_{ji}) \quad \text{ДЛЯ } i, j = 1, \dots, 8 \quad (4)$$

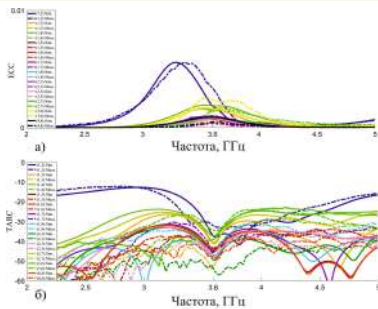
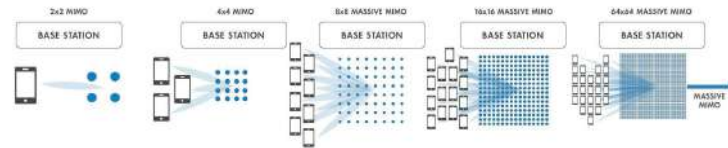


Рис. 1 – Розрахована продуктивність MIMO антени на основі виміряних та змодельованих S-параметрів



Характеристики досліджуваної конструкції

- CCL** Channel capacity loss втрата пропускної здатності каналу $\leq 0,4$ біт/с/Гц у діапазоні частот 3,3–3,9 ГГц

Пропускна здатність каналу $CC = E \left\{ \log_2 \left[\det \left(I + \frac{SNR}{n_T} H_{scale} H_{scale}^T \right) \right] \right\} \quad (1)$

Матриця каналу $H_{scale} = \sqrt{\rho_{scale,RX}} H_{i,i,d} \sqrt{\rho_{scale,TX}} \quad (2)$

Таблиця 1. Порівняльні параметри між запропонованою конструкцією та відомими антенами смартфона 5G

Тип конструкції	Смуга пропускання, ГГц	ККД, %	Розмір, мм ²	Ізоляція, дБ	ECC
перевернутий-F	3.4–3.6	55–60	100×50	10	—
монополь	4.55–4.75	50–70	136×68	10	—
самоізолюваний монополь	3.4–3.6	60–70	150×75	18	<0.015
щільно розташовані пари	3.4–3.6	50–70	150×73	17	<0.07
петля	2.55–2.6	48–63	136×68	11	<0.15
слот	3.4–3.8	50–75	150×75	16	<0.01
вбудований хвилевід	3.4–3.6	50–80	150×75	15	<0.2
перевернутий-L монополь	3.4–3.6	40–60	136×68	14	<0.2
перевернутий-F	3.4–3.6	—	120×70	19	—
монополь	3.4–3.6	35–50	150×75	11	<0.40
самодоповнюючий	3.55–3.65	52–76	150×75	11	<0.02
монопольний слот	2.55–2.68	48–63	136×68	12	<0.15
круглий кільцевий слот	3.3–3.9	60–80	150×75	18	<0.005

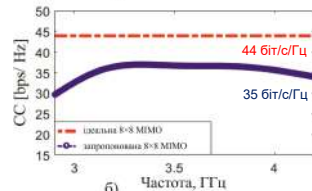
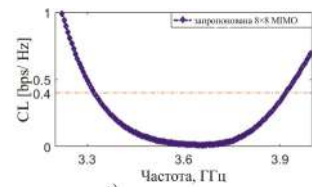


Рис. 1 – Розрахункова продуктивність каналу: а) CC, б) CL

Запропонована конструкція забезпечує кращі характеристики з точки зору ефективності, ізоляції та ECC.

Вплив користувача на характеристики антени

Запропоновані елементи антени забезпечують **35–60% загальної ефективності** в робочому діапазоні

Завдяки своїй симетричній конфігурації антена MIMO працює майже однаково для даних досліджуваних режимів.



- а) Правий/передній шар,
- б) Правий/нижній шар,
- в) Лівий/передній шар,
- г) Лівий/нижній шар

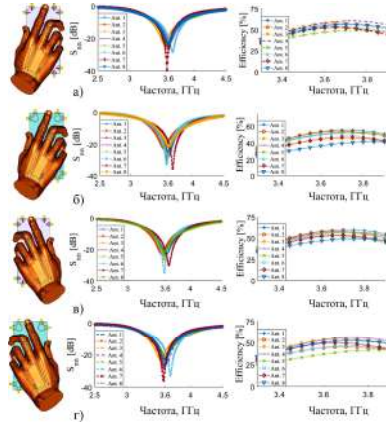


Рис. 1 – Коefіцієнта відбиття S_{11} та ефективність антени MIMO для режимів з розташуванням рук користувача:

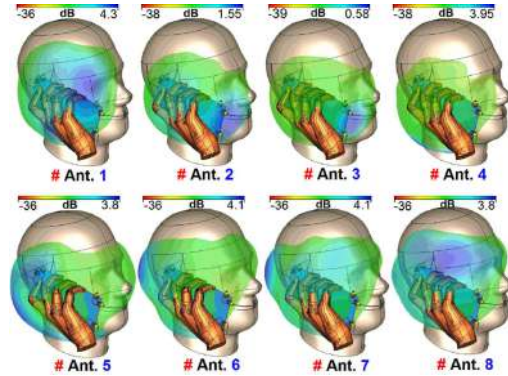


Рис. 2 – Прозорі види 3D діаграм спрямованості в режимі розмови

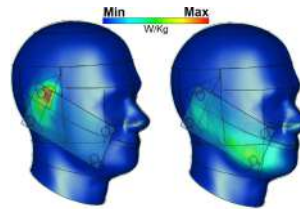
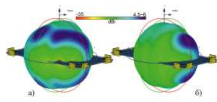


Рис. 3 – Аналіз питомого коefіцієнта поглинання (SAR) конструкції MIMO для а) Ant. 1, б) Ant. 7

Ефективність антени при наявності компонентів смартфона

Загальні ККД елемента знижуються з 60–80% до 20–40%.



Суміжні елементи забезпечують підсилення на 3–4 дБ із зменшенням на 2 дБ у порівнянні попередніми результатами

- спостерігається значне зниження продуктивності антени;
- елементи все ще резонують навколо бажаних 3,6 ГГц і можуть забезпечити >30% ККД.
- діаграми спрямованості елементів все ще можуть охоплювати як верхню, так і нижню сторони друкованої плати

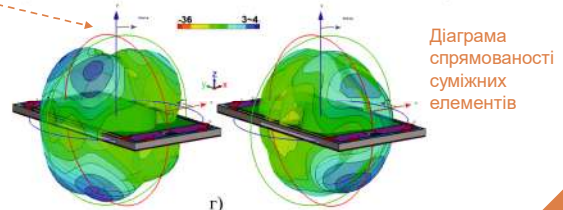
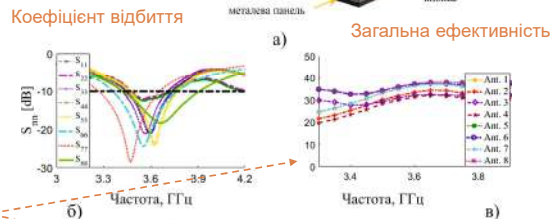


Рис. 1 – Ефективність антени за наявності компонентів смартфона

ВИСНОВКИ

- представлено нову конструкцію антени МІМО з випромінювачами з ортогональною подвійною поляризацією для смартфонів 5G. Частота роботи випромінювачів становить від 3,3 до 3,9 ГГц з резонансом 3,6 ГГц.
- досліджено фундаментальні властивості конструкції антени, включаючи S-параметр, ефективність, діаграми спрямованості, результати ECC і TARC.
- наведені характеристики антени в присутності користувача. Результати показали, що антена має достатні характеристики, що відповідають вимогам для використання в мобільних телефонах 5G.
- використовуючи нову техніку живлення, запропонована антена решітка смартфона також може генерувати дво- або багатодіапазонну характеристику.
- завдяки наявності вільного простору в конструкції антени смартфона, компактну мм-хвильову фазовану антену з широкою смугою пропускання та кінцевими пучками випромінювання можна легко інтегрувати на антені смартфона 5G.

17



ДЯКУЮ
ЗА УВАГУ!

Доповідь завершено

Завідувачу кафедри телекомунікацій,
медійних та інтелектуальних технологій
д.т.н., доценту ПІДЧЕНКУ Сергію
здобувача вищої освіти
ЛОБАЧОВОЇ Інни
ФІТ, гр. ТРМ-21-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (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.

25 листопада 2022 р.
дата


підпис

Ім'я користувача:
Kafedra TMIT KhNU

Дата перевірки:
02.12.2022 12:44:14 EET

Дата звіту:
02.12.2022 12:47:21 EET

ID перевірки:
1013152284

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

ID користувача:
100005657

Назва документа: Лобачова_ТРМ-21

Кількість сторінок: 83 Кількість слів: 13317 Кількість символів: 103369 Розмір файлу: 4.54 MB ID файлу: 10129089

0.53% Схожість

Найбільша схожість: 0.25% з Інтернет-джерелом (https://metis-ii.5g-ppp.eu/wp-content/uploads/deliverables/METIS-II_D..)

0.31% Джерела з Інтернету

4

Сторінка 85

0.22% Джерела з Бібліотеки

18

Сторінка 85

0.11% Цитат

Цитати

2

Сторінка 86

Не знайдено жодних посилань

0% Вилучень

Немає вилучених джерел

Fri Dec 02 17:13:59 EET 2022, Стецюк Віктор Іванович, Хмельницький національний університет, ХНУ

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 0.0%

Словари проверки: en_US, ru_RU, ua_UA. Ошибка в документах: 10%

ID: 108899 Название: Синтез антенной рознесёной ММО - решётки для мобильной сети 5G Добавлено в БД: 2022-12-02 Авторы: Лобачова Іна Володимирівна Руководители: Мішан Віктор Володимирович Консультанты: Опоненты:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	82727	1252	394 (0%)	8 (1%)

Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы

РІШЕННЯ

кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

ПРО ДОПУСК МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

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

Назва: Синтез антенної рознесеної МІМО-реши́тки для мобільної мережі 5G

Автор: Лобачова Інна Володимирівна

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: к.т.н., доцент Мішан Віктор Володимирович

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.	відповідає
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: Виявленні запозичення не є плагіатом так як розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), складають 0,53% та мають посилання на приведенний список літературних джерел.

«02» грудня 2022 р.

Науковий керівник



Віктор МІШАН

Завідувач кафедрою ТМІТ



Сергій ПІДЧЕНКО

ВІДГУК

на дипломну роботу

студентки групи ТРМ-21-1 Інни ЛОБАЧОВОЇ

«Синтез антенної рознесеної МІМО-решітки для мобільної мережі 5G»

Технологія довгострокового розвитку поступово стає стандартною для мобільних мереж 5G та майбутніх технологій 6G привертає до себе багато уваги. Оскільки мобільний зв'язок 5G/6G потребуватиме вищої швидкості передачі даних і стабільнішої якості сигналу, система з кількома входами та багатьма виходами (МІМО) для мобільних телефонів привернула багато уваги завдяки своїй хорошій продуктивності у покращенні швидкості передачі даних.

Багатоблокова система МІМО є однією з основних технологій для роботи 5G/6G. Незважаючи на те, що впровадження багатоблокової технології МІМО збільшить пропускну здатність каналу, розміщення великої кількості антен в обмеженому просторі (забезпеченому смартфоном) призведе до погіршення ізоляції та ефективності випромінювання. Таким чином, як інтегрувати кілька антен із хорошими характеристиками в смартфон 5G, зараз є новою складною темою для розробників антен.

Актуальність роботи полягає у аналізі методів множинних входів/множинних виходів МІМО. Для досягнення мети використані методи множинного доступу в бездротовому зв'язку для передачі даних від одного пристрою до іншого через радіоресурси.

Під час роботи над дипломною роботою Інна ЛОБАЧОВА виконала детальний аналіз вітчизняної, закордонної технічної літератури та патентних матеріалів, що дозволило прийняти оптимальні рішення під час виконання роботи.

У процесі виконання дипломної роботи Інна ЛОБАЧОВА проявила креативність, ініціативність, старанність, наполегливість, здатність та вміння застосовувати набуті знання для вирішення складних завдань, обізнаність у сучасних системних та інформаційних технологіях.

Дипломну роботу виконано на високому технічному рівні, вона має безперечну актуальність в області сучасних телекомунікацій, а студентка Інна ЛОБАЧОВА заслуговує оцінки «відмінно».

Керівник:
к.т.н., доцент



Віктор МІШАН

РЕЦЕНЗІЯ

на магістерську дипломну роботу
тема: «Синтез антенної рознесеної МІМО-решітки для мобільної мережі 5G»
студентка групи ТРм-21-1 Інна ЛОБАЧОВА

Згідно з вимогами мобільного зв'язку, низькопрофільні, широкопasmові антенні елементи з достатнім взаємним зв'язком є нагальною потребою в терміналах 5G для портативних пристроїв. Оскільки простір портативного пристрою обмежений, конфігурацію кількох антен важко встановити в такому обмеженому пристрої. Таким чином, інтеграція кількох елементів антени в мобільний телефон є новим викликом.

В дипломній роботі представлено нову конструкцію антени МІМО з випромінювачами з ортогональною подвійною поляризацією для смартфонів 5G. Її конфігурація використовує вісім портів/чотири випромінювачі модифікованих круглих кільцевих випромінювачів, розташованих на чотирьох краях материнської плати мобільного телефону. Частота роботи випромінювачів становить від 3,3 до 3,9 ГГц з резонансом 3,6 ГГц. Досліджуються фундаментальні властивості конструкції антени смартфона, включаючи S-параметр, ефективність, діаграми спрямованості, результати ЕСС і TARC. Зразок прототипу розробленої МІМО-антени було виготовлено та надано їй вимірювання.

Крім того, в роботі наведені характеристики антени в присутності користувача. Конфігурація антени проста і легка для виготовлення за допомогою технології друкованих схем. Результати показали, що антена має достатні характеристики, що відповідають вимогам для використання в мобільних телефонах 5G.

В цілому дипломну роботу виконано на високому технічному рівні, вона має безперечну актуальність в області сучасних технологій телекомунікацій, а здобувач вищої освіти Інна ЛОБАЧОВА заслуговує оцінки *«відмінно»*.

Опонент:

к.т.н., доцент кафедри
фізики та електротехніки

Олександр СРЬОМЕНКО