

БОЙКО ЮЛІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>e-mail: [boiko\\_julius@ukr.net](mailto:boiko_julius@ukr.net)

КАРПОВА ЛЕСЯ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5015-2107>[rtlesya@gmail.com](mailto:rtlesya@gmail.com)

СЕМЕНЮК ВІТАЛІЙ

Хмельницький національний університет

[vitalik06714@gmail.com](mailto:vitalik06714@gmail.com)

## ВИСОКОРІВНЕВА ОДНОПЛОЩИННА АНТЕНА МІМО ДЛЯ ДЕВАЙСІВ 5G

В даній роботі представлено конструкцію одноплосинної антенної системи МІМО для смартфонів із підтримкою 5G на частоті нижче 6 ГГц. Розроблена антена МІМО складається з чотирьох випромінювачів у формі петлі, які розташовані у кожному куті плати мобільного телефону, що відповідає принципу рознесення діаграм спрямованості. Елемент з однією антеною резонує на частоті 3,5 ГГц, його смуга пропускання імпедансу становить 1,28 ГГц (3–4,28 ГГц) для  $S_{11} \leq -6$  дБ, і дорівнює 720 МГц (3,18–3,9 ГГц) для  $S_{11} \leq -10$  дБ. Для одноантенного елемента спостерігається пікове підсилення 3,64 дБі з ефективністю антени понад 90%. Для конфігурації антени МІМО між її елементами досягається ізоляція понад 10 дБ. Крім того, розроблена антена МІМО забезпечує достатнє покриття випромінюванням для підтримки різних сторін плати мобільного телефону, що є важливою особливістю для усіх телефонів з підтримкою 5G.

Ключові слова: антена МІМО, діаграма спрямованості, смуга пропускання, петлеподібна конструкція, коефіцієнт активного відбиття, ефективність, коефіцієнт підсилення, 5G смартфони.

BOIKO JULIY, KARPOVA LESYA, SEMENYUK VITALIY

Khmelnytskyi National University

## SINGLE PLANE MIMO ANTENNA FOR 5G DEVICES

This work presents the design of a single-plane multiple-input/multiple-output MIMO antenna system for smartphones with 5G support at a frequency below 6 GHz. The developed MIMO antenna consists of four loop-shaped emitters located at each corner of the mobile phone board, which conforms to the principle of pattern diversity. The single-antenna element resonates at 3.5 GHz, has an impedance bandwidth of 1.28 GHz (3–4.28 GHz) for  $S_{11} \leq -6$  dB, and is 720 MHz (3.18–3.9 GHz) for  $S_{11} \leq -10$  dB. For a single-antenna element, a peak gain of 3.64 dBi is observed with an antenna efficiency of >90%. For the MIMO antenna configuration, isolation >10 dB is achieved between its elements. In addition, the designed MIMO antenna provides sufficient radiation coverage to support different sides of the mobile phone board, which is an important feature for all 5G-enabled phones. A planar multiple-input/multiple-output MIMO antenna design is presented for sub-6 GHz 5G-enabled mobile phone applications. Four loop-shaped radiators are designed at each corner of a smartphone board, and they all follow the design configuration of pattern diversity. Several MIMO antenna features are evaluated, such as S-parameters, gain patterns, radiation and total efficiency, envelope correlation coefficient, total active reflection coefficient, and diversity gain. From the reported results, it may be concluded that the presented MIMO antenna system successfully meets the criteria of 5G-enabled mobile phones. In addition, the impacts of human hands and heads on MIMO antenna performance are investigated, and acceptable performance in the data and conversation modes is observed.

Keywords: MIMO antenna, pattern, bandwidth, loop design, active reflection coefficient, efficiency, gain factor, 5G smartphone.

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Для зв'язку п'ятого покоління (5G) більшість мобільних операторів зосереджуються на отриманні високої пропускної здатності та високої швидкості передачі даних при низькій вартості. Системи 5G мають швидкість передачі даних у 1000 разів більшу порівняно з системами зв'язку четвертого покоління (4G). Такої високої швидкості передачі даних можна досягти за допомогою технології використання кількох передавальних та кількох приймальних антен МІМО (Multiple Input Multiple Output). У антенах МІМО швидкість передачі даних можна покращити шляхом зменшення багатопроменевого затухання або використання кількох незалежних каналів. Одним із основних ключових моментів до підвищення пропускної здатності каналу є розробка кількох антен для кожного каналу. Антена МІМО повинна мати низький взаємозв'язок, що є необхідною умовою для системи мобільного зв'язку 5G. Крім того, антени МІМО можуть запропонувати краще рознесення та підсилення мультиплексування, що призводить до збільшення пропускної здатності каналу.

### Аналіз досліджень та публікацій

В контексті даної тематики, були розглянуті кілька антен МІМО на частоті нижче 6 ГГц. Так, в роботі [1] була розроблена восьмиелементна структура антени МІМО для спектру частоти 3,5 ГГц. Розроблено симетричну щільну антену з відкритою вилкою та L-подібну фідерну смугу. Ця конфігурація забезпечує ізоляцію >17,5 дБ між елементами антени, але конструкція страждає через низьку ефективність антени. Така ж конфігурація з прямокутним слотом була представлена в статті [2]. Решітки антени МІМО

склалися з двох видів антенних елементів для роботи на різних частотах. Два елементи однакової конфігурації були розміщені у верхньому та нижньому кутах друкованої плати для зв'язку 2G/3G/4G, тоді як вісім елементів, що призначені для роботи на частоті 3,5 ГГц, були розміщені зліва та справа від панелі друкованої плати. В статті [3] розробили восьмипортову широкосмугову антену МІМО на частоті нижче 6 ГГц. Єдина антена системи МІМО складалася з лінії живлення потужністю 50 Вт з розімкнутим контуром налаштування, слотом на металевій рамі та U-подібним слотом на площині заземлення. Антена МІМО може забезпечувати широкосмугову характеристику в діапазоні частот 3,3–6 ГГц. У роботі [4] була представлена монопольна щілинна антена МІМО для діапазонів частоти 2,6/3,5 ГГц. Чотири металеві каркасні антени, що живляться за допомогою L-подібної лінії живлення, були розташовані в середині друкованої плати, тоді як інші елементи були розміщені на верхній і нижній сторонах друкованої плати.

Антенна решітка МІМО у роботі [5] була розроблена для додатків смартфонів 5G на частоті 3,5 ГГц. Масив складався з двох різних варіантів: один був L-подібним масивом із спільним живленням, а інший являв собою U-подібний масив петлі, які були встановлені на металевій рамі смартфона. Для покращення ізоляції автори створили інвертований I-слот і лінію нейтралізації між компонентами антени, що призводить до ізоляції 15 дБ у робочій смузі частот. У роботі [6] розроблено восьмипортову антену МІМО на основі I-подібного елемента для технологій IoT та 5G. Щоб забезпечити простір для додаткових компонентів, металевий каркас телефону було сконструйовано для розміщення компонентів антени. Виявилося, що антена ефективно резонує в діапазоні частот 3,5 ГГц. Антена МІМО забезпечує 13 дБ ізоляції між елементами решітки, з коефіцієнтом підсилення 4 дБі та ефективністю антени понад 40%.

Інтегрована антенна система МІМО [7] розроблена для LTE (Long Term Evolution) та міліметрового діапазону частот. Розроблена структура антени складалася з двох елементів для зв'язку LTE і чотирьох елементів для зв'язку 5G на міліметровому діапазоні. Для обох частотних діапазонів використовувався модифікований прямокутний випромінювач. Крім того, дефекти в заземленій площині були введені за допомогою прямокутних і круглих форм. Розроблений антенний елемент забезпечує резонанс для діапазону частот 5,5 ГГц. Одноплощинна рамкова антена решітка МІМО під частотою 6 ГГц була розроблена в [8]. Антени організовані таким чином, щоб вони могли запропонувати як поляризацію, так і рознесення діаграм спрямованості. Крім того, покращення ізоляції було досягнуто шляхом створення стрілоподібної смуги між елементами антени. У роботі [9] автори розробили антенну решітку МІМО з копланарним хвильоводом для додатків смартфона на частоті нижче 6 ГГц. Для конструкції були обрані Г-подібні та Т-подібні випромінювальні елементи. Використовуючи копланарну хвильоводну техніку, було досягнуто ізоляції >15 дБ у смузі, що нас цікавить.

Вищезазначені антени МІМО мають деякі обмеження з точки зору неплоских конфігурацій, великих розмірів і складних структур. Крім того, ці антени страждають через низьку ефективність випромінювання, що в результаті призводить до поганого підсилення антени. Щоб усунути недоліки раніше опублікованих робіт, це дослідження представляє чотириелементну одноплощинну антенну систему МІМО для смартфонів 5G. Для одиночної антени вибирається елемент у формі петлі. Елементи випромінювання розташовані в кожному куті друкованої плати, що відповідає принципу різноманітності структур і звільняє місце для інших компонентів смартфона. Результати показують, що розроблена антена МІМО забезпечує широкосмугову характеристику у діапазоні частот 3,5 ГГц.

Запланована топологія МІМО має низький взаємозв'язок між антенами, що призводить до низького коефіцієнта кореляції обвідної і високого коефіцієнта підсилення. Крім того, запропонована антена МІМО забезпечує ефективність понад 90%.

### Виклад основного матеріалу

Запропонована конструкція МІМО-антени на частоті нижче 6 ГГц наведена на рис. 1. Для конструкції антени МІМО використовується недорога підкладка FR-4. Товщина підкладки 1,6 мм і має відносну діелектричну проникність  $\varepsilon = 4,4$ . Для економії місця на друкованій платі для конструкції антени була використана петлеподібна конструкція [10]. На частоті 3,5 ГГц електрична довжина випромінювача приблизно дорівнює  $1\lambda$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі. Таким чином, оптимізована електрична довжина елемента антени становить  $\approx 45,5$  мм, а ширина лінії дорівнює 1 мм. Варто відзначити, що один елемент антени може займати максимальну площу  $14,5 \times 12$  мм<sup>2</sup>.

Антена МІМО, наведена на рис. 1, складається з чотирьох випромінювачів у формі петлі, розташованих у кожному куті друкованої плати мобільного телефону. Поверхня заземлення розміщена на одній площині з елементами випромінювання. Параметри конструкції запропонованої антени МІМО наведена на рис. 1, а оптимізовані значення наведено у таблиці 1.

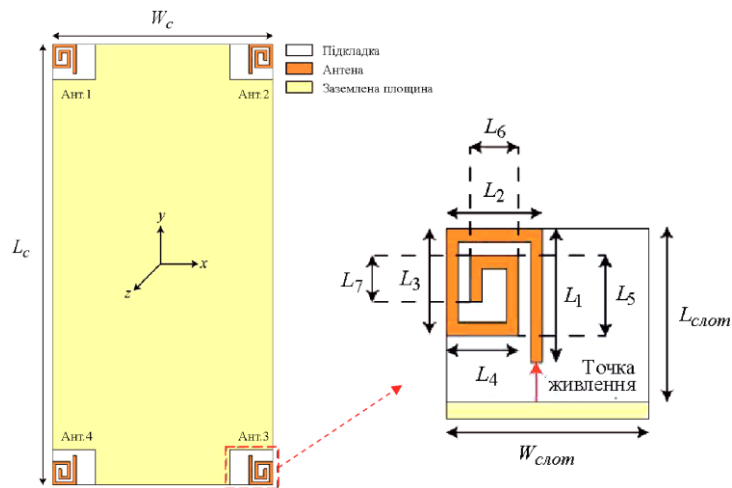


Рис. 1. Конструкція запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

Таблиця 1

Оптимізовані параметри антени МІМО на частоті до 6 ГГц (у мм)

| $L$ | $W$ | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $L_4$ | $L_5$ | $L_6$ | $L_7$ | $L_{\text{слот}}$ | $W_{\text{слот}}$ |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------------------|
| 150 | 75  | 10    | 8     | 8     | 6     | 6     | 4     | 3.5   | 12                | 14.5              |

Для живлення антенного елемента використовується дискретний порт 50 Вт. На рис. 2 наведено змодельований коефіцієнт відбиття ( $S_{11}$ ) одного елемента антени. Помічено, що елемент антени добре резонує в діапазоні частот 3,5 ГГц і забезпечує широкосмугову характеристику. Відзначено, що ширина смуги імпедансу  $-6$  дБ і  $-10$  дБ становить 1,28 ГГц (3–4,28 ГГц) і 720 МГц (3,18–3,9 ГГц) відповідно.

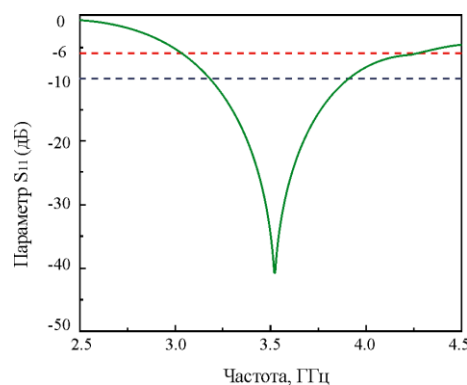


Рис. 2. Змодельовані характеристики  $S_{11}$  одноантенного елемента

Коефіцієнт відбиття  $S_{11}$  запропонованої антени можна регулювати, змінюючи деякі параметри антени. Для певної конструкції параметри  $W_{\text{слот}}$  і  $L_{\text{слот}}$  мають великий вплив на продуктивність.

Параметр  $W_{\text{слот}}$  відіграє важливу роль у досягненні узгодження імпедансу в діапазоні заданої частоти, тоді як параметр  $L_{\text{слот}}$  можна налаштувати для отримання резонансу для потрібного діапазону частот. Цей ефект чітко спостерігається в результатах на рис. 3, де наведено характеристики  $S_{11}$  розробленої антени для змінних  $W_{\text{слот}}$  і  $L_{\text{слот}}$ .

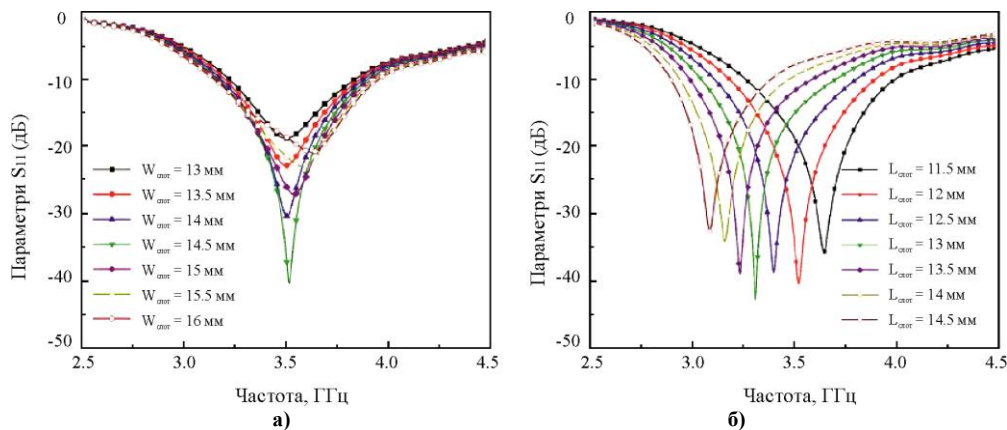


Рис. 3. Змодельовані характеристики  $S_{11}$  для різних значень: а)  $W_{\text{слот}}$  і б)  $L_{\text{слот}}$

На рис. 3а наведено характеристики  $S_{11}$  запропонованої антени для змінних значень параметра  $W_{\text{слот}}$ . З рисунку видно, що параметр  $W_{\text{слот}}$  має значний вплив на узгодження імпедансу. Максимальне узгодження імпедансу спостерігається для  $W_{\text{слот}} = 14,5$  мм, як показано на рис. 3а. З іншого боку, при зміні значення параметра  $L_{\text{слот}}$  в діапазоні від 11,5 мм до 14,5 мм, спостерігається зсув резонансної частоти, як показано на рис. 3б. Важливо зазначити, що ці значення мають незначний вплив на характеристики ізоляції антен МІМО.

Змодельовані S-параметри запропонованої антени МІМО наведено на рис. 4, де видно, що розроблена антена МІМО добре резонує для діапазону частот 3,5 ГГц. Крім того, відзначається, що мінімальна ізоляція між прилеглими елементами антени становить понад 10 дБ.

У коефіцієнті відбиття  $S_{11}$  спостерігаються зміни, які в основному відбуваються через точки живлення та різне розташування елементів антени на друкованій платі смартфона, як показано на рис. 1. Крім того, материнська плата [11] має прямокутну форму, що може спричинити певні розбіжності в частотній характеристиці та зв'язках, переважно між парними та непарними номерами портів. Однак можна налаштувати потрібний діапазон частот, змінюючи параметри конструкції, як це показано на рис. 3.

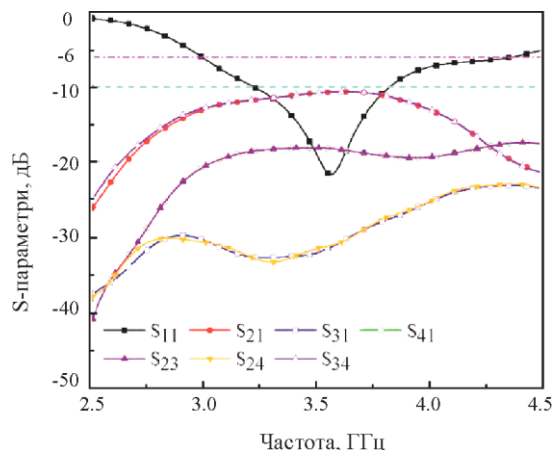


Рис. 4. Змодельовані S-параметри запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

Змодельовані тривимірні (3D) діаграми підсилення розробленої антени наведені на рис. 5. Антена генерує різні вертикальні та горизонтальні поляризовані діаграми для вибраного діапазону частот, як показано на діаграмі. Крім того, як показано на рис. 5, коефіцієнт підсилення антени становить  $\sim 3,6$  дБі. Отримані діаграми ще більше підтверджують, що антена МІМО підтримує рознесеність діаграм, що є бажаною функцією для додатків смартфона.

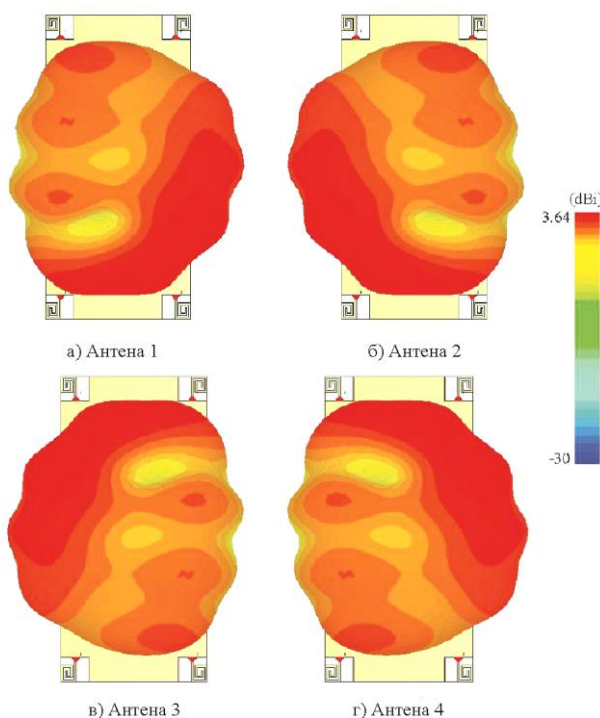


Рис. 5. Тривимірні діаграми підсилення запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

Одним із найважливіших аспектів у визначенні ефективності антен МІМО є коефіцієнт кореляції обвідної. Для практичних застосувань коефіцієнт кореляції обвідної має бути понад 0,5, а в ідеалі він приблизно дорівнює нулю. Коефіцієнт кореляції обвідної (ECC) можна визначити, використовуючи S-параметри системи МІМО [12–14]:

$$ECC = \frac{|S_{jj}^* S_{ij} + S_{ij}^* S_{ii}|^2}{(1 - |S_{jj}|^2 - |S_{ji}|^2)(1 - |S_{ij}|^2 - |S_{ii}|^2)}, \quad (1)$$

де  $S_{ii}$  та  $S_{jj}$  – коефіцієнти відбиття, а  $S_{ji}$  та  $S_{ij}$  – коефіцієнти передачі антени МІМО.

Як показано на рис. 6а, значення коефіцієнта кореляції обвідної для передбачуваного діапазону частот (3,5 ГГц) становить менше 0,01. Результати також демонструють високу ізоляцію між елементами антени, що є вирішальним фактором для одночасного функціонування. Підсилення від рознесеності (DG) запропонованої антени МІМО, з іншого боку, можна розрахувати наступним чином [14]:

$$DG = 10 \left( \sqrt{1 - ECC^2} \right). \quad (2)$$

Для представленої антени МІМО значення  $K_p$  становить понад 9,9 дБ, як показано на рис. 6б.

Загальний коефіцієнт активного відбиття (TARC) є ще одним важливим показником, який слід враховувати при оцінці роботи антени МІМО, і його можна визначити наступним чином [15–18]:

$$TARC = \sqrt{\frac{(S_{mm} + S_{mn})^2 (S_{nm} + S_{nn})^2}{2}}. \quad (3)$$

Результати демонструють, що запропонована антена МІМО забезпечує TARC понад 20 дБ для заданого діапазону, як показано на рис. 6в.

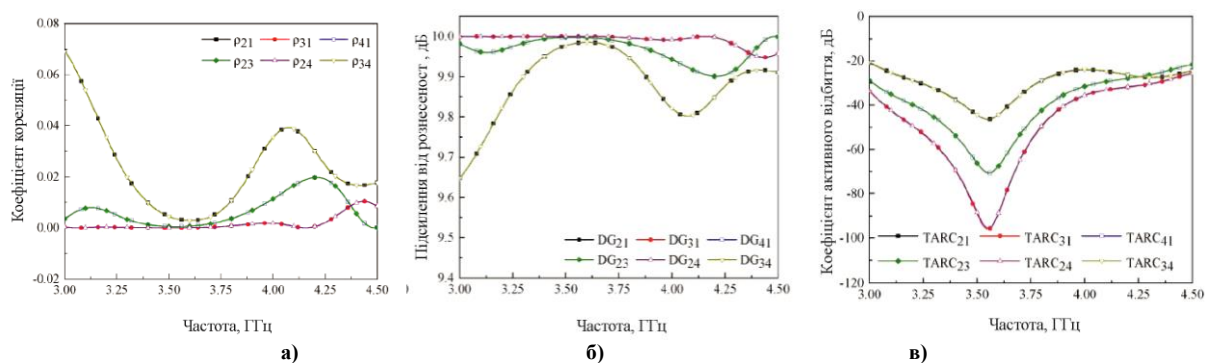


Рис. 6. Змодельовані результати для запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц:  
а) коефіцієнт кореляції обвідної, б) підсилення від рознесення в) загальний коефіцієнт активного відбиття

Змодельоване підсилення для порту-1 наведено на рис. 7а. Коефіцієнт підсилення вимірюється живленням порту-1, тоді як порт-2 за допомогою узгодженого навантаження 50 Вт. Середнє змодельоване підсилення на порту 1 становить 4 дБі (рис. 7а). Змодельоване підсилення коливається в діапазоні від 2 до 4,75 дБі. Результати випромінювання та загальної ефективності для порту-1 наведено на рис. 7б. Помічено, що розроблена антена має ефективність випромінювання понад 90%, при цьому загальний ККД коливається в межах 70–95%. На рис. 7б слід звернути увагу на те, що розроблена антена забезпечує постійну ефективність випромінювання в обраному діапазоні частот.

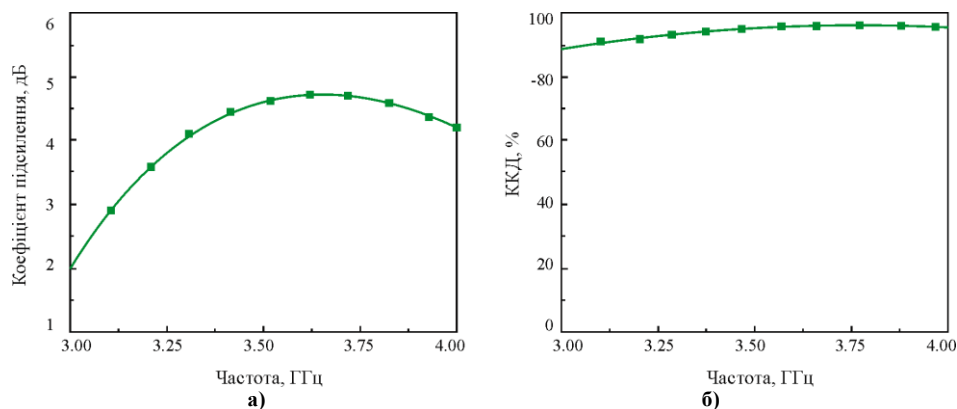


Рис. 7. Змодельовані: а) коефіцієнт підсилення, і б) загальна ефективність запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц, коли порт-1 активний

Змодельовані характеристики випромінювання порту-1 для частот 3,2 ГГц, 3,5 ГГц і 3,9 ГГц наведено на рис. 8. Розроблена антена МІМО забезпечує квазівсеспрямовані характеристики випромінювання як для площини  $yz$ , так і для площини  $xz$  на заданих частотах. Крім того, антена МІМО забезпечує рознесення діаграм спрямованості в площині  $xz$ , як показано на рис. 8.

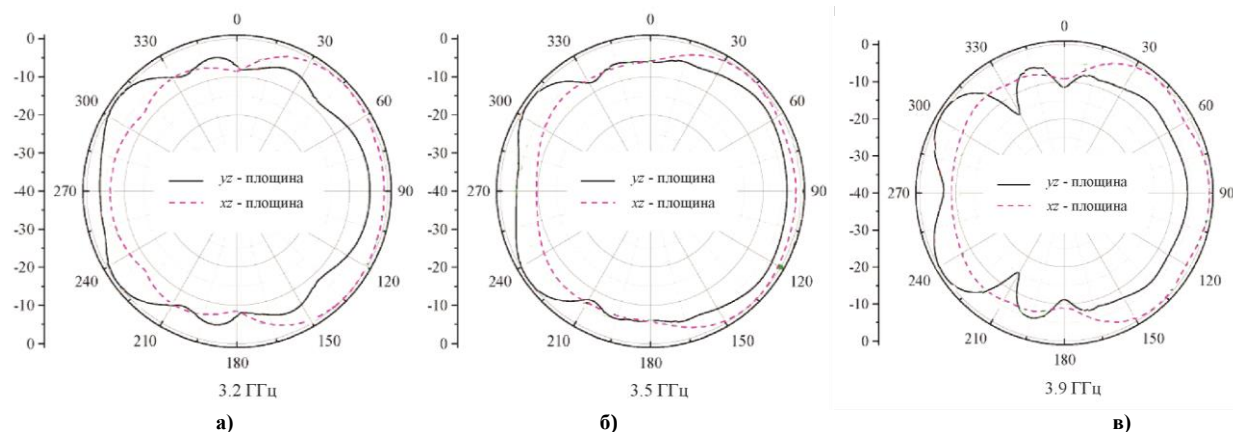


Рис. 8. Характеристики випромінювання запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц, коли порт 1 активний

Для антен, що використовуються в смартфонах, одне з найважливіших питань є питомий коефіцієнт поглинання (SAR). Питомий коефіцієнт поглинання – це параметр, який вимірює кількість електромагнітних хвиль, які поглинає людський організм..

Характеристики питомого коефіцієнта поглинання для моделі голови користувача досліджено та наведено на рис. 9. Мінімальний SAR становить 0,94 Вт/кг для Антени 2, тоді як максимальне значення SAR становить 2 Вт/кг для Антени 3. Відповідно, що чим ближче елементи до моделі голови, тим вище значення SAR, і навпаки.

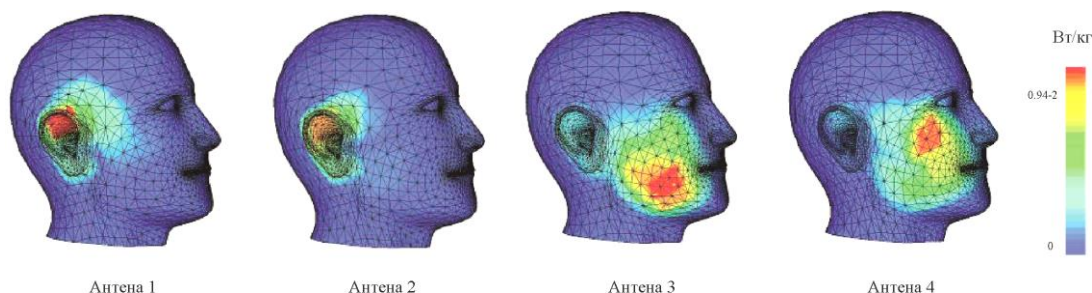


Рис. 9. Аналіз коефіцієнта питомого поглинання під час використання антени МІМО у режимі розмови

### Висновки

Представлено одноплосинну конструкцію антени МІМО для мобільних телефонів із підтримкою 5G з частотою нижче 6 ГГц. Чотири випромінювачі у формі петлі розроблені в кожному куті плати смартфона, і всі вони відповідають конструкції налаштування різноманітності шаблонів. Оцінюються деякі функції антени МІМО, такі як S-параметри, діаграми підсилення, випромінювання та загальна ефективність, коефіцієнт кореляції обвідної, загальний коефіцієнт активного відбиття та посилення рознесення. З отриманих результатів можна зробити висновок, що представлена антенна система МІМО успішно відповідає критеріям мобільних телефонів з підтримкою 5G.

### References

1. Li, Y., Luo, Y., Yang, G. High-isolation 3.5 GHz eight-antenna MIMO array using balanced open-slot antenna element for 5G smartphones. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2019, 67, 3820–3830.
2. Ullah, R., Ullah, S., Ullah, R., Faisal, F., Mabrouk, I.B., Al Hasan, M.J. A 10-Ports MIMO Antenna System for 5G Smart-Phone Applications. *IEEE Access* 2020, 8, 218477–218488.
3. Zhang, X., Li, Y., Wang, W., Shen, W. Ultra-wideband 8-port MIMO antenna array for 5G metal-frame smartphones. *IEEE Access* 2019, 7, 72273–72282.
4. Abdullah, M., Kiani, S.H., Iqbal, A. Eight element MIMO antenna for 5G mobile applications. *IEEE Access* 2019, 7, 134488–134495.
5. Jiang, W., Liu, B., Cui, Y., Hu, W. High-isolation eight-element MIMO array for 5G smartphone applications. *IEEE Access* 2019, 7, 34104–34112.
6. Kiani, S.H., Altaf, A., Abdullah, M., Muhammad, F., Shoaib, N., Anjum, M.R. Damaševičius, R.

Blažauskas, T. Eight element side edged framed MIMO antenna array for future 5G smart phones. *Micromachines* 2020, 11, 956.

7. Iffat Naqvi, S. Hussain, N. Iqbal, A. Rahman, M. Forsat, M. Mirjavadi, S.S. Amin, Y. Integrated LTE and Millimeter-Wave 5G MIMO Antenna System for 4G/5G Wireless Terminals. *Sensors* 2020, 20, 3926.

8. Parchin, N.O., Basherlou, H.J., Al-Yasir, Y.I., Abd-Alhameed, R.A. A broadband multiple-input multiple-output loop antenna array for 5G cellular communications. *AEU-Int. J. Electron. Commun.* 2020, 127, 153476.

9. Parchin, N.O., Al-Yasir, Y.I., Abdulkhaleq, A.M., Basherlou, H.J., Ullah, A., Abd-Alhameed, R.A. A New broadband MIMO antenna system for sub 6 GHz 5G cellular Communications. In *Proceedings of the 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Copenhagen, Denmark, 15–20 March 2020, pp. 1–4.

10. Ahmad, U., Ullah, S., Rafique, U., Choi, D.Y., Ullah, R., Kamal, B., Ahmad, A. MIMO Antenna System With Pattern Diversity for Sub-6 GHz Mobile Phone Applications. *IEEE Access*, 2021, 9, 149240–149249.

11. Kovtun I., Boiko J., Petrashchuk S. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards. In *2017 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, Ukraine, 2017, pp. 1-4.

12. Boiko J., Polikarovskiykh O., Tkachuk V., Yehoshyna H., Karpova L., Tkachuk. V. Design Concepts for Mobile Computing Direction Finding Systems. *Mobile Computing and Sustainable Informatics: Proceedings of ICMCSI 2023*, vol. 166. Springer, Singapore. 2023, pp. 89-107.

13. Boiko J., Polikarovskiykh O. Tkachuk V. Development and modeling of the antenna system the direction finder unmanned aerial vehicle. *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, vol. 13, no. 1, pp. 26-32, March 2023.

14. Mazloun, J., Ghorashi, S.A., Ojaroudi, M., Ojaroudi, N. Compact Triple-Band S-Shaped Monopole Diversity Antenna for MIMO Applications. *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.* 2015, 30, 975–980.

15. Kumar, A., Ansari, A.Q., Kanaujia, B.K., Kishor, J. High isolation compact four-port MIMO antenna loaded with CSRR for multiband applications. *Frequenz* 2018, 72, 415–427.

16. Sharawi, M.S. Printed multi-band MIMO antenna systems and their performance metrics [wireless corner]. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2013, 55, 218–232.

17. Parhomey I. R., Boiko J. M., Eromenko O. I. Features of digital signal processing in the information control systems of multipositional radar. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 77, no. 2, pp. 75-84, Aug. 2016.

18. Boiko, J., Karpova, L. Increasing Efficiency in the Correlation Processing of Information Signals for Radar. *Proceedings of Fourth International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 977. Springer, Singapore. 2023.