

МІШАН Віктор

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2771-7285>e-mail: [v\\_mishan@ukr.net](mailto:v_mishan@ukr.net)

КАРПОВА Леся

Хмельницький національний університет

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

ЛОБАЧОВА Інна

Хмельницький національний університет

e-mail: [innabazilyk@gmail.com](mailto: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, KARPOVA Lesia, LOBACHOVA Inna  
Khmelnitskyi 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  $75 \times 150$  mm<sup>2</sup>. 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 single element 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 (МІМО) може експоненціально збільшити швидкість передачі даних і ефективність використання спектра без необхідності збільшення потужності передачі та пропускну 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 МІМО та працювати в кількох діапазонах. Тому антени МІМО повинні використовуватися в майбутніх портативних пристроях, таких як мобільні телефони та планшети [2].

Згідно з вимогами стільникового зв'язку, низькопрофільні, широкосмугові 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 МІМО 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 МІМО 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 різноманіттям поляризації. В результаті антена MIMO забезпечує не тільки повне покриття випромінюванням, але й поляризаційне різноманіття для кожної сторони друкованої плати.

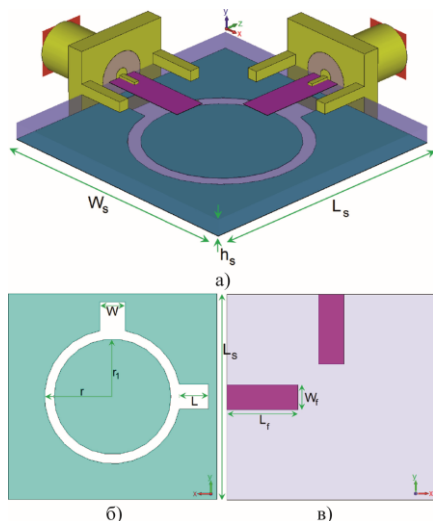
Конфігурація антенного елемента складається з компактного круглокілевого щілинного випромінювача з парою мікросмужкових живильних ліній. Щоб зменшити характеристику взаємного зв'язку портів, під кожною мікросмужковою лінією живлення була вирізана прямокутна щілина. Вона забезпечує досить хорошу смугу 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**

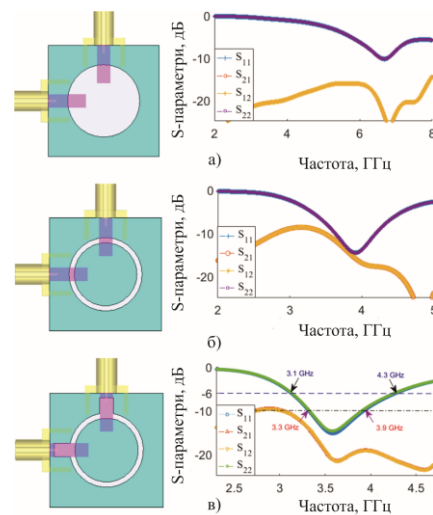
Конфігурація розробленої подвійної поляризованої круглої кільцевої антени проілюстрована на рис. 1. Вона розроблена на діелектрику FR-4 діаметром 1,6 мм ( $\epsilon = 4,4$  і  $\delta = 0,025$ ) для роботи на частоті 3,6 ГГц. Конфігурація антени містить пару мікросмужкових ліній живлення разом із кільцевим 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) запропонований 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.

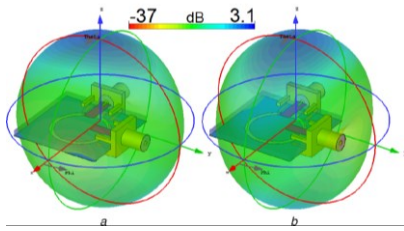


Рис. 3. Щільність струму та 3D діаграми спрямованості на частоті 3,6 ГГц

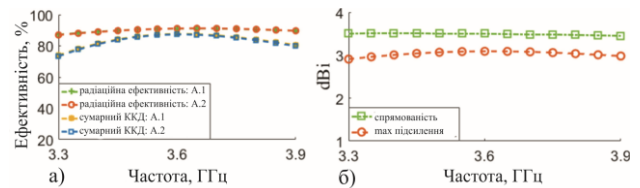


Рис. 4. Основні властивості рознесеної антени з подвійною поляризацією: а) ефективність антени (ККД); б) спрямованість і максимальне підсилення

На рис. 5 показані тривимірні діаграми спрямованості антен 1 і 2 на частоті 3,6 ГГц, у яких елементи антени мають квазіспрямовану 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 мікросмужковими 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.

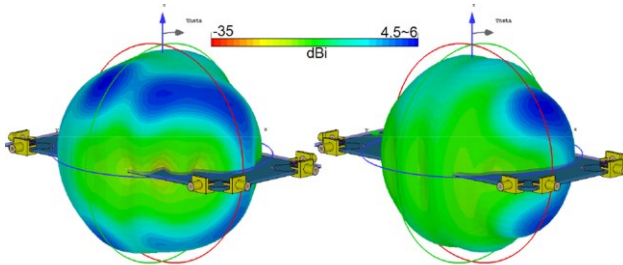


Рис. 5. Тривимірні діаграми спрямованості конструкції смартфона 5G

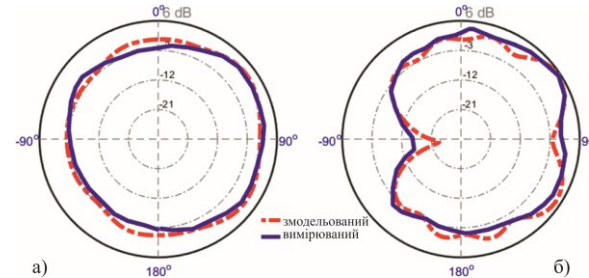


Рис. 6. Виміряні та змодельовані діаграми спрямованості полярного випромінювання на частоті 3,6 ГГц для: а) ант.1; б) ант.2

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  $8 \times 8$  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 МІМО має дуже низький CCL у всьому робочому діапазоні: для системи МІМО досягається  $< 0,4$  біт/с/Гц у діапазоні частот 3,3–3,9 ГГц. Для подальшого дослідження продуктивності МІМО запропонованої системи антени смартфона розрахована пропускна здатність каналу (CC) показана на рис. 7б. Пропускна здатність каналу можна визначити наступним чином:

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

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

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

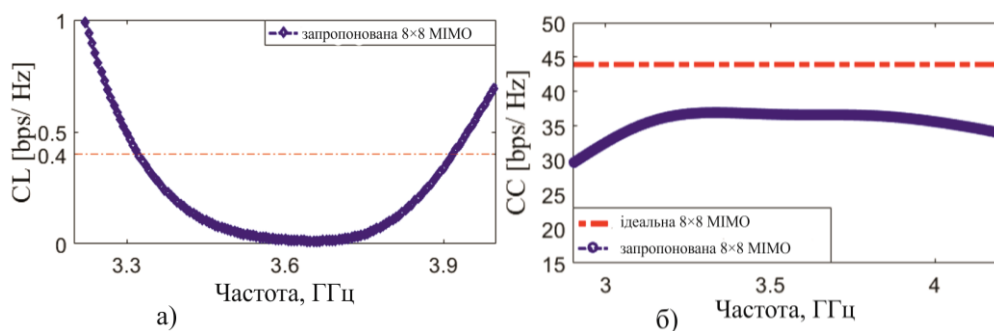


Рис. 7. Розрахункова продуктивність каналу: а) CC; б) CL

Як видно з рис. 7б, 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. 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.

### 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