

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

[vitakik06714@gmail.com](mailto:vitakik06714@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

Khmelnitskyi 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 пропускну 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 пропускну 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 пропускну 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

складалися 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 монополярна 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. Виявилось, 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. Одноплосинна 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 хвилеводом для додатків смартфона на частоті нижче 6 ГГц. Для конструкції були обрані Г-подібні та Т-подібні випромінювальні елементи. Використовуючи копланарну хвилеводну 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 одноплосинну 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  $\epsilon = 4,4$ . 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.

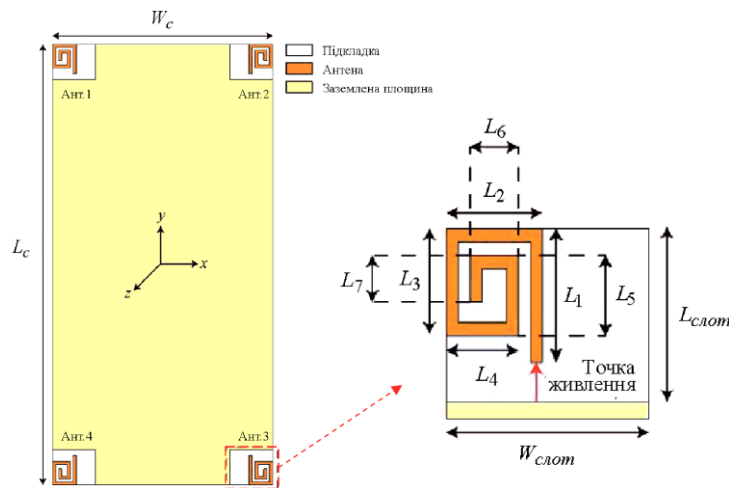


Рис. 1. Конструкція запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

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.

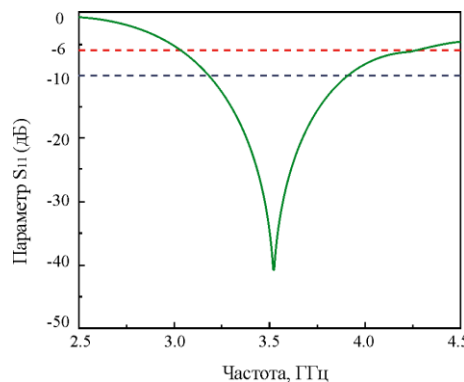


Рис. 2. Змодельовані характеристики  $S_{11}$  одноантенного елемента

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  $L_{\text{слот}}$ .

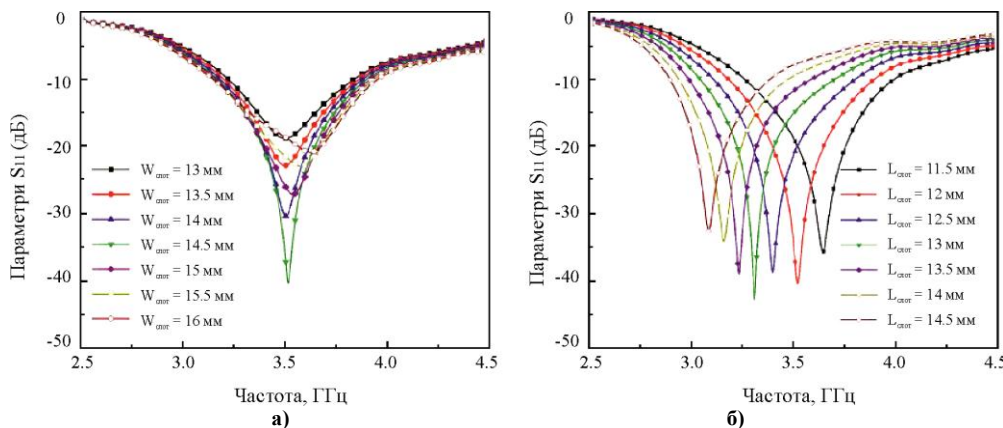


Рис. 3. Змодельовані характеристики  $S_{11}$  для різних значень: а)  $W_{\text{слот}}$  і б)  $L_{\text{слот}}$

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.

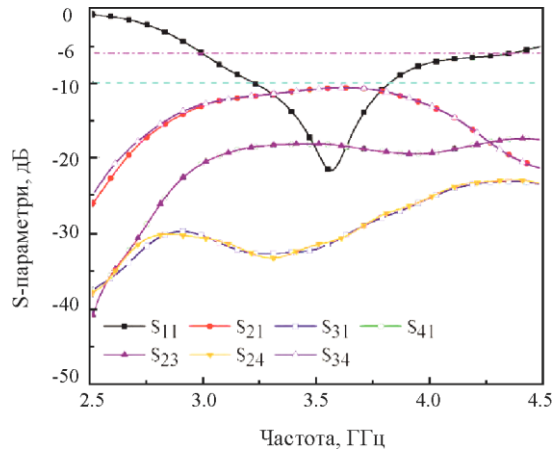


Рис. 4. Змодельовані  $S$ -параметри запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

Змодельовані тривимірні (3D) діаграми підсилення розробленої антени наведено 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.

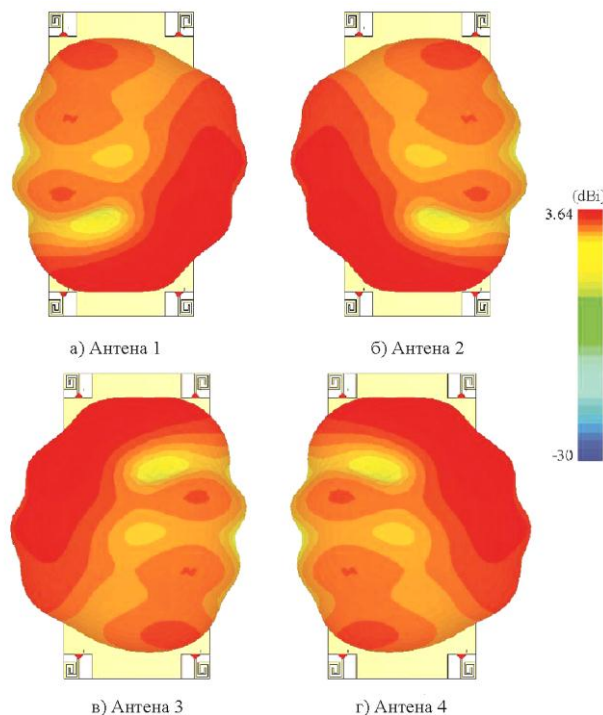


Рис. 5. Тривимірні діаграми підсилення запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц

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.

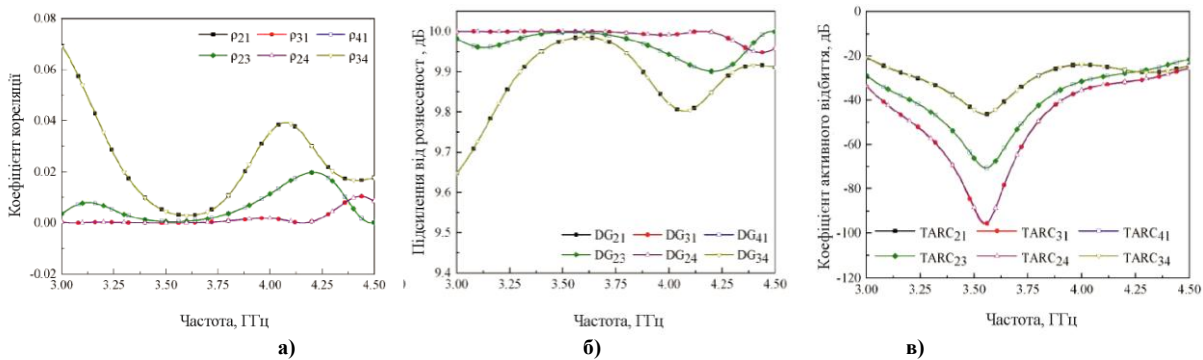


Рис. 6. Змодельовані результати для запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц: а) коефіцієнт кореляції обвідної, б) підсилення від рознесення в) загальний коефіцієнт активного відбиття

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.

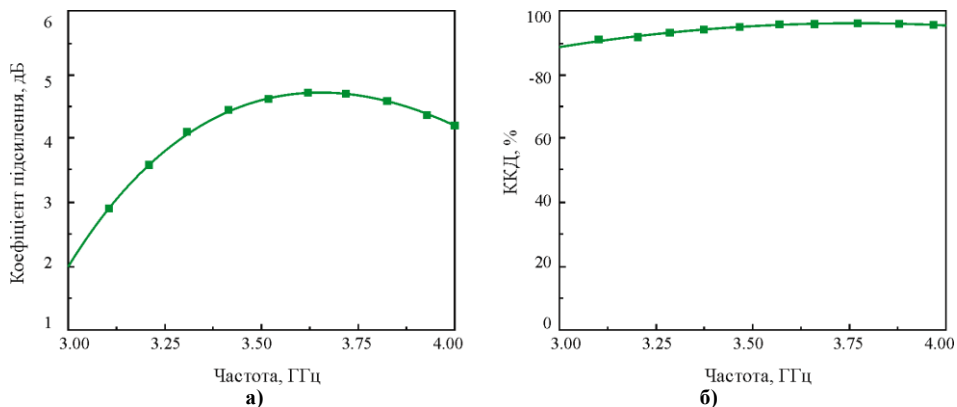


Рис. 7. Змодельовані: а) коефіцієнт підсилення, і б) загальна ефективність запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц, коли порт-1 активний



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 квазівспрямовані 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.

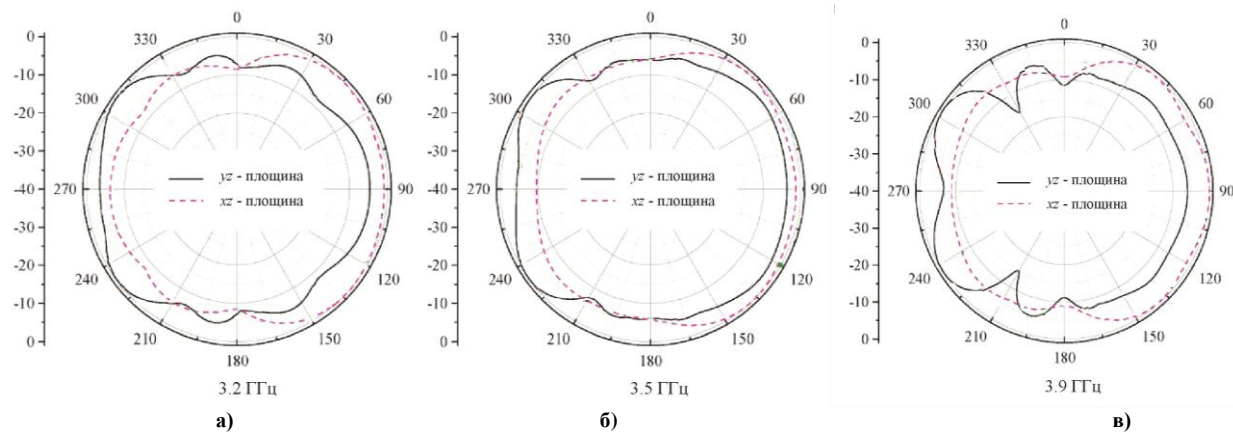


Рис. 8. Характеристики випромінювання запропонованої антени МІМО на частоті нижче 6 ГГц, коли порт 1 активний

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.

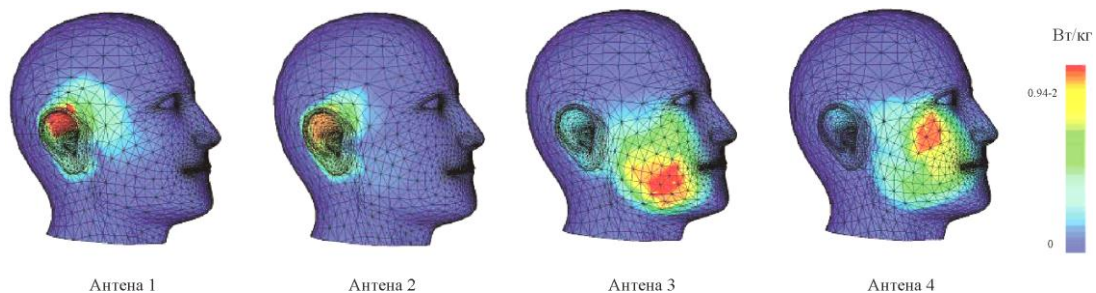


Рис. 9. Аналіз коефіцієнта питомого поглинання під час використання антени МІМО у режимі розмови

### 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.

БУРЕНКО ВОЛОДИМИР

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

<https://orcid.org/0000-0002-0862-5879>e-mail: [volodymyr.burenko22@gmail.com](mailto:volodymyr.burenko22@gmail.com)

## АНАЛІЗ НАПОВНЕНОСТІ ЗУПИНОК ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ З ІР-КАМЕР «РОЗУМНОГО МІСТА»

В роботі розглянуто методи реєстрації кількості людей на зупинці пасажирського транспорту. Проведений аналіз використання глобальних (порогових) та локальних (адаптивних) методів бінаризації зображень, отриманих з ІР-камер, які є хостами інформаційно-виміральної мережі Smart City. Доведено доцільність використання алгоритму Оцу для знаходження оптимального порогу при бінаризації зображень у процесі планування пасажироперевезень. Наведено приклад роботи розробленого застосунку на мові JavaScript при розрахунку загальної кількості пікселів із фото людей на зупинці.

**Ключові слова:** інформаційно-виміральна мережа, відеоспостереження, розумне місто, пасажироперевезення, обробка зображень, методи бінаризації, діаграма яскравості, кросплатформний застосунок.

BURENKO VOLODYMYR O.  
Admiral Makarov National University of Shipbuilding

## ANALYSIS OF FILLING OF PASSENGER TRANSPORT STOPS USING ALGORITHMS OF IMAGE PROCESSING FROM SMART CITY IP CAMERAS

Counting the number of people at a passenger transport stop is necessary to ensure the timely delivery of vehicles of the required capacity to existing stops. In addition, it is necessary to provide for the construction of new public transport stops on the main routes of large cities in case of overloading of the existing ones. Computer systems of the "smart city" make it possible counting the number of people at the stops due to innovative technologies. For example, it is possible to use sensors that react to the presence of people, and turn on the sidewalk lights. The increasing spread of video surveillance systems within the Smart City makes it expedient to use video streams or photos from IP cameras, which are the end hosts of the information-measurement network. The analysis of the use of global (threshold) and local (adaptive) methods of binarization of images obtained from IP cameras was carried out. As a result, it is indicated that adaptive binarization can be recommended if it is necessary to process low-quality halftone images. However, in the presence of inhomogeneities of the background with low contrast, in this case the appearance of false objects is possible. At the same time, the loss of small details when using the methods of global image binarization does not affect the estimation of filling of passenger transport stops. The expediency of using Otsu's algorithm for finding the optimal threshold for image binarization in the process of passenger transportation planning is proven. The developed JavaScript application provides for the conversion of color photos from IP cameras into Grayscale images. An example of the work of the developed application when calculating the total number of pixels from photos of people at city transport stops is given.

**Keywords:** information and measurement network, video surveillance, Smart City, passenger transportation, image processing, binarization methods, brightness diagram, cross-platform application.

### Постановка проблеми

В умовах зміни ціннісних імперативів на ринку обслуговування соціально-економічних потреб населення, об'єктивного існування ризиків та пов'язаних з ними витратами, існує нагальна необхідність в ціннісно-орієнтованому управлінні бізнес-процесами, пов'язаними з впровадженням інноваційних ІТ-технологій [1]. Однією з таких проблем є організація пасажирських перевезень міським автомобільним транспортом [2]. В такому разі необхідне комплексне розв'язання задач своєчасної подачі громадського транспорту за існуючими маршрутними системами залежно від наповнення зупинок громадського транспорту пасажирями, що очікують. Тому актуальним є розробка та вдосконалення методів збору і обробки інформації про пасажиропотоки, моделювання системи пасажирського транспорту міст, а також математичних моделей і програмного забезпечення (ПЗ) маршрутизації перевезень пасажирів на основі інформаційно-вимірвальних мереж (ІВМ), інтегрованих в комп'ютерні системи «розумного міста» (Smart City).

### Аналіз останніх джерел

В роботі [3] наведено дослідження щодо визначення підходів до мінімізації витрат проекту з використанням подвійних задач. Практична реалізація викладеного методу можлива при виведенні на обстежені маршрути пасажироперевезень транспорту, місткість якого відповідає заповненості зупинок людьми.

В міській інфраструктурі все ширше використовуються кіберфізичні або «розумні» системи. Відповідно до запропонованої в [4] інформаційно-технологічної архітектури мережевої платформи моніторингу кіберфізичних об'єктів «розумних міст», яка базується на трьох рівнях інфраструктури (кіберфізичний, мережевий та хмарний), найбільш обширним є мережевий рівень. Однією з найбільш розгалужених комп'ютерних систем цього рівня є інформаційно-вимірвальна мережа, кінцевими хостами якої виступають ІР-камери, що здійснюють відеоспостереження на зупинках міського транспорту. Однак, у [4] також зазначено, що на даний час широкомасштабне запровадження кіберфізичних систем



супроводжується обширним переліком невіршених задач, до яких зокрема відноситься експоненційне зростання обсягів даних та відсутність загальноприйнятих підходів до формування засобів їх зберігання та аналітичного опрацювання. За такими умовами необхідно розробити методи та алгоритми формування та передачі на сервери обробки даних зображень з системи відеоспостереження, зроблених згідно з дискретними відклинами у часі.

У науковій літературі також наведені результати досліджень впровадження додаткових зупинок міського пасажирського транспорту в залежності від просторової самоорганізації населення [5]. У наведених моделях передбачена розбудова додаткових зупинок, спричинених перенавантаженням існуючих зупинок, спричинених соціологічними умовами життєдіяльності суспільства. У роботі визначено, що своєчасність подачі пасажирського транспорту має забезпечувати добові витрати часу на переміщення, які для міст не повинні перевищувати меж у 50–90 хв. Для забезпечення таких умов нові розроблювані алгоритми обробки зображень в інформаційно-вимірювальній мережі моніторингу наповненості зупинок пасажирського транспорту мають також діагностувати перенавантаженість існуючих зупинок та визначати верхню межу їх наповненості. До того ж, для ефективної роботи моделі обробки інформації в зазначеній комп'ютерних системах необхідно зонування зупинок при одночасному обслуговуванні кількома видами транспорту.

Для вирішення проблеми часових затримок під час планування інтенсивності транспортного потоку у роботі [6] розроблено моделі організації та регулювання дорожнього руху наповненості магістральних вулиць та доріг великих і найбільших міст. Зменшенню часових затримок у пасажироперевезеннях присвячені дослідження у роботі [7]. Розроблені підходи потребують у подальшому експериментальної перевірки шляхом проведення імітаційного та/або натурального експерименту на вибраних об'єктах з визначенням меж навантаженості кожної зупинки.

**Метою роботи є** дослідження методів визначення кількості пасажирів, які очікують транспорт на зупинках, на основі бінаризації зображень із IP-камер системи відеоспостереження у складі Smart City.

#### Виклад основного матеріалу

В архітектурі комп'ютерних мереж для Smart City зростає кількість IP-камер, які найбільшою часткою встановлюються на зупинках пасажирського транспорту та можуть бути використані для задач інформаційно-вимірювальній мережі моніторингу наповненості таких зупинок з наступним плануванням вчасної подачі транспорту необхідної місткості. Моніторинг наповненості зупинок пасажирського транспорту – це процес визначення рівня зайнятості зупинок та контролю за кількістю пасажирів, які користуються транспортом на конкретній зупинці. Це важлива інформація для операторів транспорту, яка дозволяє їм ефективно планувати рух транспорту, забезпечувати комфортні умови для пасажирів і покращувати якість обслуговування.

Для моніторингу наповненості зупинок пасажирського транспорту можуть використовуватися різні технології. Одна з них – використання сенсорів, які реєструють рух людей на зупинці. Наприклад, можна на тротуарі встановлювати сенсори, які реагують на присутність людей та фіксують їх рух (рис. 1). Такі датчики повинні мати ступінь захисту не нижче IP65, при спрацьовуванні передавати живлення на джерело світла (нп., LED-світильник Ногоз Electric AWAX-1). Таким чином, для обліку може використовуватись потужність датчика, яка дорівнює сумарній потужності світильників, що включилися. Ця інформація може передаватися операторам транспорту для подальшого аналізу.



Рис. 1. Тротуарні LED-світильники: а – лінійні; б – точкові; в – вбудований датчик руху e100101

Важливим етапом в обробці зображень, отриманих з IP-камер IBM Smart City, є сегментація зображень, яка допомагає вирішувати складні завдання комп'ютерного зору.

Одним з основних методів сегментації зображень є використання глибоких згорткових нейронних мереж (англ. Deep Convolutional Neural Networks – CNN). Ці мережі можуть навчитися автоматично визначати границі об'єктів та розподіляти пікселі зображення до відповідних сегментів [8]. Використання глибокого навчання (англ. Deep Learning – DL or ML) дозволяє досягти високої точності та швидкості обробки зображень. Сегментація зображення базується на принципах розривності та подібності.

Принцип розривності передбачає, що сусідні сегменти зображення повинні бути різними об'єктами або різними частинами одного об'єкта. Це означає, що границі між сегментами повинні бути чіткими і не перетинатися.

Принцип подібності передбачає, що пікселі в межах одного сегмента повинні мати подібні характеристики, такі як колір, текстура або яскравість. Це означає, що об'єкти з однаковими характеристиками будуть належати до одного сегмента.