

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБІВ РАДІОЧАСТОТНОГО СКАНУВАННЯ

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет

### *Анотація*

*Розглянуто технічні проблеми та потенційні напрямки досліджень у галузі радіочастотного сканування, а також визначено конкретні технічні проблеми, пов'язані зі скануванням на основі візуалізації. Досліджено спільне багатовузлове радіочастотне сканування, яке значно покращує характеристики локалізації. Розглянуто взаємодія знижує невизначеність вимірювань та забезпечує більше охоплення, а також більш високу точність та роздільну здатність вимірювання за рахунок об'єднання даних.*

**Ключові слова:** мережа 6G, засіб радіочастотного сканування, критерій Найквіста, система сканування, пасивна та активна локалізації.

### *Abstract*

*Technical challenges and potential areas of research in the field of radio frequency scanning are reviewed, and specific technical challenges associated with imaging-based scanning are identified. Joint multi-node radio frequency scanning, which significantly improves localization characteristics, was studied. The considered interaction reduces measurement uncertainty and provides greater coverage, as well as higher accuracy and resolution of measurement due to data fusion.*

**Keywords:** 6G network, radio frequency scanning tool, Nyquist criterion, scanning system, passive and active localization.

### **Вступ**

У порівнянні з 5G використання набагато ширшої смуги пропускання та ресурсів антенної решітки в системі 6G ISAC обіцяє нам як нові можливості, так і нові проблеми. Найбільш очевидною перевагою з точки зору сканування є покращена роздільна здатність і точність, а основні проблеми можна розглянути наступним чином: фрагментація ресурсів, оскільки будучи підсистемою 6G, обладнання радіочастотного сканування не може одночасно використовувати всю смугу пропускання, часовий інтервал та антенні елементи, тому ресурси, виділені для сканування будуть фрагментарно розкидані по різних областях. Отже, одна з основних проблем пов'язана з ефективним формуванням сигналу та координацією розподілу ресурсів у часовій, частотній та просторовій областях без погіршення спектральної ефективності та продуктивності сканування; висока складність реалізації, оскільки для передачі даних при скануванні в мережах 6G використовується велика смуга пропускання що передбачає дуже високі частоти дискретизації, широкосмугові сигнали та навантажені канали обробки. Це породжує серйозні проблеми у вигляді складності обчислень та високого енергоспоживання; знижене покриття системи, оскільки в системах 6G робоча частота збільшується до вищих меж, покриття системи зменшується при збереженні кількості базових станцій і загальної споживаної потужності. Крім того, NLOS-характер поширення сигналу погіршує проблему покриття через суворі умови навколишнього середовища (наприклад, усередині приміщень і в міських умовах). Отже, навіть незважаючи на те, що висока частота може потенційно забезпечити високу роздільну здатність і високу точність сканування, телекомунікаційній системі може не вистачати вузлів для постійного надання високоякісних послуг; труднощі реалізації високої роздільної здатності, оскільки засоби сканування на основі 6G передбачено використовувати у сценаріях, де потрібна висока роздільна здатність. У той же час реалізація високої роздільної здатності ставить перед розробниками такі завдання, як сканування у ближньому полі за допомогою великих антенних решіток, розробка спеціальних радіосигналів для скорочення часу сканування, сканування об'єктів зі складною внутрішньою структурою.

Метою роботи є дослідження способів підвищення ефективності засобів радіочастотного сканування із підвищеною роздільною здатністю за рахунок використання великих антенних решіток, спеціальних радіосигналів для скорочення часу сканування.

## Результати дослідження

При вирішенні задач підвищення ефективності засобів радіочастотного сканування із підвищеною роздільною здатністю розглянемо кілька перспективних напрямів досліджень: враховуючи, що підсистеми зв'язку та сканування в системі 6G спільно використовують ресурси в часовій, частотній і просторовій областях передбачається спільна розробка сигналів для радіочастотного сканування. Отже, важливо координувати ці ресурси, щоб задовольнити технічні вимоги обох підсистем. Фактично сканування може не займати всю смугу пропускання, часові інтервали та елементи антенної решітки, тому, доцільно зменшувати виділення ресурсів для сканування за рахунок розрідженого розподілу. Враховуючи, що об'єкт сканування або параметри навколишнього середовища зазвичай не змінюються різко через фізичні обмеження реального світу (тобто канал не змінюється раптово за період когерентності), для поділу частотно-часового підпростору можна використовувати попередні показники. В результаті миттєва смуга пропускання кожного часового інтервалу буде лише дискретним сегментом повної пропускну здатності, а роздільна здатність результату після оброблення буде таким же, як і продуктивність при повній пропускну здатності. У системі 6G потреба у цінних ресурсах передачі може бути зменшена за рахунок розрідженої структури сигналу сканування – за умови збереження надвисокої роздільної здатності. При цьому, можна використовувати заощаджені ресурси, щоб гарантувати якість послуг зв'язку, і, тому варто розглянути питання про розрідження сигналів сканування в об'єднаному просторі (частотно-часовому просторі) сигналів без погіршення характеристик сканування; алгоритм стиснутого радіочастотного сканування передбачає використання стислої вибірки (CS) і теорії дискретизації, які надають математичну основу процесу приймання та обробки широкого класу аналогових сигналів із частотою дискретизації нижче, ніж критерій Найквіста. За своєю сутністю CS включає відновлення розріджених векторів великої розмірності з досить невеликої кількості вимірних даних, і його можна легко розширити до розріджених сигналів на будь-якому відповідному базисі.

На додаток до всього CS може ефективно знизити обчислювальне навантаження. Хоча традиційні методи радіочастотного сканування надійно оцінюють цільові параметри, які вимагають, щоб сигнал дискретизувався з частотою не нижче за критерій Найквіста. Наприклад, вони використовують узгоджену фільтрацію (MF) або стиснення імпульсів, щоб максимізувати відношення сигнал/шум (SNR) у присутності адитивного білого гаусового шуму. У деяких випадках також можуть використовуватися інші фільтри для оптимізації різних показників, таких як відношення пікових та бічних пелюсток (PSLR) та інтегроване відношення бічних пелюсток (ISLR) [1-3]. Роздільна здатність сканування обернено пропорційна носію функції неоднозначності, тим самим обмежуючи можливість виконання більш точної роздільної здатності для близько розташованих цілей. В результаті для досягнення високої роздільної здатності по діапазону багато сучасних систем радіочастотного сканування використовують широку смугу пропускання, зазвичай від декількох сотень МГц і аж до десятків ГГц. Це вимагає високошвидкісних АЦП та призводить до значних накладних витрат обчислювальної потужності. Для підвищення можливості алгоритмів високої роздільної здатності з широкою смугою пропускання, висунуто пропозицію про дискретизацію сигналу та оцінку параметрів об'єкта дослідження з частотою нижче Найквіста [4]. На додаток до частотної області було також запропоновано аналогічну субдискретизацію в доплерівській області [5]. Радіочастотні пристрої сканування з антенними ґратками стикаються з порівнянними проблемами дискретизації в просторовій області, і тому варто вивчити, як обробка по Найквісту з просторовою субдискретизацією може використовуватися в пристроях з масивом МІМО з меншою кількістю антенних елементів без зниження кутової роздільної здатності; сканування з високою роздільною здатністю в ближньому полі, оскільки при певних характеристиках каналу велика кількість антен може повністю задіяти шлях поширення передачі, тим самим збільшуючи пропускну здатність каналу зв'язку. Крім того, завдяки розвитку високочастотних технологій та мікросхем антени з великою решіткою сантиметрового рівня можуть бути широко інтегровані та розгорнуті на високих частотах, коли буде доступний спектр субТГц- або ТГц-частот. Після цього, процес сканування з високою роздільною здатністю із використанням антени з великою решіткою, буде розглядатися як вбудована функція системи ISAC. Крім того, враховуючи обмеження щодо потужності передачі та втрат у тракту передачі на більш високих частотах (наприклад, ТГц), доцільно використовувати функцію ISAC у межах малого радіусу дії кінцевого пристрою. Наприклад, обладнання користувача, скануватимуть середовище в межах кількох десятків метрів або навіть кількох метрів, що імовірно означає роботу системи в області ближнього поля.

Звичайні системи сканування в основному працюють за рахунок випромінювання електромагнітного сигналу у вільному просторі та приймання сигналів відлуння від відбивачів/розсіювачів. Сигнал, що використовується для відображення, може випромінюватись у ближньому або дальньому полі залежно від розміру апертури антени  $D$  та робочої довжини хвилі передавача. У табл. 1 показано залежність розміру ближньої зони від розміру антенної решітки та частоти.

Таблиця 1. Розмір ближньої зони для різних антен

Частота, ГГц	Розмір ближнього поля (м), обчислене як $2D^2$		
	256 елементів (16×16)	1024 елементів (32×32)	2048 елементів (45×45)
3.5	11	44	87
6	6	26	51
10	4	15	30
39	0.98	3.9	7.8
73	0.5	2.1	4.2
140	0.3	1.1	2.2

При відображенні у дальній зоні електромагнітні хвилі приходять як плоскі хвилі. У той же час, якщо виходити з припущення, що ми працюємо в дальньому полі, невелика різниця у відстані мало впливає на амплітуду сигналів відлуння і, по суті, ми можемо прийняти відстань до кожної точки на об'єкті дослідження приблизно однаковою відстанню. Використовуючи спрощену формулу радіолокаційного відлуння можна відновити зображення об'єкта дослідження за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Однак у разі ближнього поля різниця фаз між центральною точкою та краєм об'єкта дослідження відносно велика; тому необхідно використати гіпотезу сферичної хвилі. Таким чином, у формулі візуалізації з'являється нелінійний фазовий член, і при зменшенні відстані наближена обробка не може використовуватися для зменшення обчислювального навантаження; одночасна активна та пасивна локалізація (CAPL) необхідна для вирішення проблеми локалізації, яка може здатися достатньо складною через невідомі позиції користувачів, що здійснюють навігацію та відсутність відомостей про середовище поширення сигналу. Водночас одне з фундаментальних відкриттів у галузі робототехніки пропонує рішення, які одночасно локалізують скануючого користувача у невідомому місці та ітеративно створюють карту навколишнього середовища. Ця парадигма отримала назву одночасного визначення місцезнаходження та відображення (SLAM) і заснована на передумові, що відображення та позиціонування не є окремими проблемами. Іншими словами, якщо ми розглядатимемо їх як незалежні проблеми, то будуть отримані неоптимальні відповіді.

Взаємопов'язаний характер попередньої проблеми був математично доведений піонерами робототехніки в 1990-х роках [6, 7]. Проблема зв'язку процесів картування/локалізації також має логічне пояснення: неточна карта безпосередньо впливає на точність позиціонування скануючого пристрою, а неточне місце безпосередньо перетворюється на неточну карту. Отже, якби скануючий пристрій було встановлено в статичній точці занадто складної карти, а не на мобільному навігаційному пристрої, вимірювання, ймовірно, були б такими ж. Це також означає, що незалежно від того, де встановлений модуль сканування (на навігаційному пристрої або у фіксованій точці), єдина проблема полягає в знаходженні об'єктів, з якими взаємодіє сенсорний сигнал. Ця взаємодія може бути відображенням, прийомом чи передачею. Тому, між пасивною та активною локалізаціями не лише відсутня концептуальна різниця, а й ці дві проблеми справді пов'язані.

Все це говорить про те, що одночасні пасивна та активна локалізації (CAPL) з використанням тільки портативних пристроїв сканування стикаються з серйозними проблемами. На щастя, поява безлічі варіантів використання 6G, таких як безпілотні літальні апарати, транспортні засоби та пристрої IoT може полегшити реалізацію CAPL. За допомогою БПЛА, транспортних засобів, пристроїв IoT та пристроїв, що допомагають мережам локалізувати об'єкти та будувати карту навколишнього середовища, стільникові системи можуть створювати віртуальне середовище в кіберпросторі; спільне багатовузлове радіочастотне сканування, оскільки радіочастотне сканування за допомогою спільної роботи відноситься до вузлів сканування, які діляться своїми спостереженнями один з одним і намагаються досягти загального консенсусу у відображенні навколишнього середовища, і при цьому було показано, що це значно покращує характеристики локалізації [7]. Конкретний процес включає вузли-

учасники, що формують динамічну опорну сітку за допомогою розподіленої передачі та обробки. Така взаємодія знижує невизначеність вимірювань та забезпечує більше охоплення, а також більш високу точність та роздільну здатність вимірювання за рахунок об'єднання даних.

### Висновки

Досліджено особливості реалізації пасивної та активної локалізації (CAPL) з використанням портативних пристроїв сканування та технологій 6G, таких як безпілотні літальні апарати, транспортні засоби та пристрої IoT. Розглянуто можливості стільникових систем при створенні віртуального середовища в кіберпросторі за допомогою БПЛА, транспортних засобів, пристроїв IoT та пристроїв, що допомагають мережам локалізувати об'єкти та будувати карту навколишнього середовища. Також досліджено спільне багатовузлове радіочастотне сканування, оскільки радіочастотне сканування за допомогою спільної роботи відноситься до вузлів сканування, які діляться своїми спостереженнями один з одним і намагаються досягти загального консенсусу у відображенні навколишнього середовища, і при цьому було показано, що це значно покращує характеристики локалізації. Розглянута взаємодія знижує невизначеність вимірювань та забезпечує більше охоплення, а також більш високу точність та роздільну здатність вимірювання за рахунок об'єднання даних.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Y. C. Eldar, *Sampling theory: Beyond bandlimited systems*. Cambridge University Press, 2015.
2. J. Akhtar, B. Torvik, and K. E. Olsen, Compressed sensing with interleaving slow-time pulses and hybrid sparse image reconstruction, in *Proc. 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf)*. IEEE, 2017, pp. 0006–0010.
3. M. Z. Win, Y. Shen, and W. Dai, A theoretical foundation of network localization and navigation, *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no. 7, pp. 1136–1165, 2018.
4. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Кичак В.М. *Методи та засоби підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах: Монографія*. - Вінниця: ВНТУ, 2015. - 140 с.
5. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Стальченко О.В. *Пристрій аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів. - Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.*— 2013, № 2.— С.82-85.
6. Васильківський М. В. Оцінювання енергетичних характеристик радіоканалів міліметрового діапазону [Текст] / М. В. Васильківський, О. І. Мельничук, О. В. Стальченко // *Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)"*, Вінниця, 14-16 листопада 2019 р. – 2019. – С. 80–81.
7. Васильківський М. В. Оптимізація параметрів інфокомунікаційних мереж п'ятого покоління [Текст] / М. В. Васильківський, С. О. Болдинюк // *Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПРН-2019)"*, Вінниця, 14-16 листопада 2019 р. – 2019. – С. 68–69.

**Будаш Михайло Володимирович** — аспірант групи 172-22а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: mika@budash.dp.ua

**Болдирева Ольга Сергіївна** — аспірант групи 172-19а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: rtt13bpoludenko@gmail.com

**Варгатюк Ганна Леонідівна** — аспірант групи 172-20а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: annaantonuik@gmail.com

Науковий керівник: **Васильківський Микола Володимирович** — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

**Mykhailo Volodymyrovych Budash** — graduate student of group 172-22a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mika@budash.dp.ua

**Olha Serhiivna Boldyreva** — graduate student of group 172-19a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: rtt13bpoludenko@gmail.com

**Hanna Leonidivna Varhatiuk** — graduate student of group 172-20a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: annaantonuik@gmail.com

Supervisor: **Mykola Volodymyrovych Vasylkivskyi** — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia