

**ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ МИКОЛА**

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>e-mail: [mvasylkivskyi@gmail.com](mailto:mvasylkivskyi@gmail.com)**ГОРОДЕЦЬКА ОКСАНА**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [horodecka.os@gmail.com](mailto:horodecka.os@gmail.com)**СТАЛЬЧЕНКО ОЛЕКСАНДР**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [magicphenix@gmail.com](mailto:magicphenix@gmail.com)**БУДАШ МИХАЙЛО**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [mika@budash.dp.ua](mailto:mika@budash.dp.ua)

## ІНТЕГРОВАНА РАДІОСИСТЕМА СКАНУВАННЯ ТА ЗВ'ЯЗКУ

*В статті розглянуто способи оптимізації продуктивності інфокомунікаційних систем, що включає підвищення спектральної ефективності та надійності при мінімізації затримки і енергоспоживання за рахунок повної інтеграції послуг зв'язку та сканування. Розглянуто алгоритм функціонування інтегрованої системи сканування та зв'язку та схему організації режиму зв'язку за допомогою процесу сканування на основі запропонованої узагальненої моделі інтегрованої системи сканування та передавання даних.*

*Ключові слова: інтегрована система сканування та зв'язку, мережа радіодоступу, спектральна ефективність, радіочастотне сканування, бездротовий зв'язок, гнучка система зв'язку, радарна візуалізація, томографія.*

VASYLKIVSKYI MYKOLA, HORODETSKA OKSANA, STALCHENKO OLEXANDER, BUDASH MYHAILO  
Vinnytsia National Technical University

## INTEGRATED RADIO SCANNING AND COMMUNICATION SYSTEM

*The article discusses ways to optimize the performance of information communication systems, which includes increasing spectral efficiency and reliability while minimizing delay and energy consumption due to the full integration of communication and scanning services. The functioning algorithm of the integrated scanning and communication system and the organization scheme of the communication mode using the scanning process based on the proposed generalized model of the integrated scanning and data transmission system are considered.*

*Ways to improve the efficiency of telecommunication systems due to the joint use of communication and scanning tools with the best compromise between scanning characteristics and the bandwidth of the transmission channel are considered.*

*Peculiarities of improving wireless communication systems with regard to high data transfer rates, low latency and wide connection possibilities are studied. In particular, access to other system functions, such as scanning/visualization and localization, is justified. Due to the considered innovative applications, the possibility of increasing the performance of the integrated wireless scanning and communication system (ISAC) is determined. The researched positioning process in 5G is proposed to be expanded due to additional detection functions, in particular with the use of new metrics such as accuracy and resolution. New KPIs in 6G networks are considered, replacing the KPI of positioning accuracy in 5G. As a result, key performance indicators based on different application scenarios are proposed, the accuracy of which should be from 1 to 10 cm, and the resolution should be up to 1 mm.*

*The potential of the new ISAC technology was investigated, in particular, the features of the coexistence of communication and scanning modules in an integrated solution at the system level and methods of increasing the efficiency of coexistence at the system level were considered; justification of a positive result from an integrated system solution for communication and scanning services; advantages and disadvantages of existing communication and scanning systems with implemented integration at the system level.*

*The obtained results of research on the integration of communication and scanning means, in particular: the analysis of the performance of generalized ISAC networks and the conclusions about the fundamental limits of performance obtained for a simple structure made it possible to determine the best compromise between the characteristics of scanning and the bandwidth of the communication channel, provided an opportunity to create practical schemes, which approximate a compromise of waveforms, coding tables, structures and protocols.*

*Keywords: integrated scanning and communication system, radio access network, spectral efficiency, radio frequency scanning, wireless communication, flexible communication system, radar imaging, tomography.*

### Постановка проблеми

Стільникові мережі спочатку були розроблені для забезпечення бездротового зв'язку, а швидке зростання попиту у користувачів, в значній мірі пов'язане із функцією визначення розташування мобільного засобу зв'язку, що привернуло значну увагу до досліджень позиціонування в стільникових мережах. Найбільш інтригуючі сценарії використання технологій 6G включають побудову картини навколишнього середовища за допомогою використання високоточного позиціонування, відображення та реконструкції, а також розпізнавання жестів/дій. Тому, процес ефективного сканування перетворюється на нову функціональну можливість систем 6G, яку можна охарактеризувати як процес отримання інформації про довкілля. Цей процес складається з операцій, які можна умовно віднести до однієї з двох наступних категорій: радіочастотне сканування: фактично це відправка радіосигналу та вивчення навколишнього середовища шляхом прийому та обробки відбитих сигналів; візуальне сканування (візуалізація):

використання зображень та відео, отриманих із навколишнього середовища (наприклад, за допомогою камери) для побудови просторової картини [1].

Посилаючи електромагнітну хвилю та отримуючи відлуння, радіочастотне сканування може отримувати інформацію про об'єкти в навколишньому середовищі, наприклад про існування, текстуру, відстань, швидкість, форму та орієнтацію. У сучасних системах радіочастотне сканування зводиться до класичного радару, який використовується для виявлення, локалізації та відстеження пасивних об'єктів, тобто об'єктів, які не зареєстровані у мережі. Існуючі системи радіочастотного сканування мають два основних обмеження: вони автономні та орієнтовані на конкретне застосування, тобто вони не взаємодіють з іншими радіочастотними системами; вони націлені лише на пасивні об'єкти і не можуть використовувати ознаки активних об'єктів, тобто об'єктів, зареєстрованих у мережі [2].

Основною метою проектування сучасної бездротової мережі є оптимізація продуктивності зв'язку, що включає підвищення спектральної ефективності та надійності при мінімізації затримки та енергоспоживання. Таким чином, зараз як ніколи необхідні більш інформативні, ефективні та гнучкі системи зв'язку, які покращують якість обслуговування та охоплення за рахунок різноманітних сценаріїв використання, так само як і сенсорні системи, які надають необхідні знання про навколишнє середовище. Традиційна практика включає дві різні підсистеми, які обмінюються обмеженим обсягом інформації для досягнення певного рівня пізнання, але цей підхід має багато недоліків, таких як великі накладні витрати, великий обсяг даних, неефективність і громіздкість підсистем. Альтернативний підхід ґрунтується на тому факті, що в сучасних бездротових системах передбачається значне зрушення у бік більш високих частот (таких як міліметрові хвилі і навіть ТГц-діапазон) з ширшим доступним спектром. Це дозволить системам зв'язку мати функціональні характеристики радіолокаційних систем. Отже, для зменшення потужності та форм-фактору деякі апаратні компоненти можуть використовуватися спільно двома типами систем, наприклад антени, підсилювачі потужності і генератори. Крім того, для підвищення ефективності такі системи можуть використовувати такі спільні ресурси, як час та спектр [3].

Впровадження нових технологій зумовлює подальші вдосконалення систем бездротового зв'язку щодо високих швидкостей передачі даних, низької затримки та широких можливостей з'єднання. Це відкриє користувачам доступ до інших функцій системи, таких як сканування/візуалізація та локалізація, тим самим представивши безліч інноваційних застосувань і підвищивши продуктивність майбутньої бездротової системи. В інтегрованій системі сканування та зв'язку (ISAC) сканування та зв'язок будуть двома взаємодоповнюваними функціями. Наслідуючи цю тенденцію, позиціонування в 5G (яке обмежено активними пристроями) буде розширено за рахунок додаткових функцій виявлення. Для цього необхідно застосовувати нові метрики (такі як точність і здатність) у якості нових ключових показників ефективності в мережах 6G, замінюючи КРІ точності позиціонування в 5G. В результаті, пропонуються ключові показники ефективності, що ґрунтуються на різних сценаріях застосування, точність яких може становити від 1 до 10 см, а роздільна здатність – до 1 мм. Вказані функціональні характеристики залежать від супутніх технологій, які необхідно детально дослідити [4].

### Аналіз останніх джерел

Проект партнерства 3-го покоління (3GPP) працює над інтеграцією зв'язку та позиціонування з часів GSM [1], і нещодавно було заплановано «удосконалення позиціонування для задоволення вимог до високої точності та затримки в промислових умовах в середині приміщень» як функції 5G NR, документ R17 [2]. Однак, як і в глобальній навігаційній супутниковій системі, функція позиціонування в 5G NR призначена тільки для активних об'єктів (на основі пристроїв), тобто пристрої обмінюються сигналами з кількома мережевими вузлами, а потім оцінюють інформацію про місцезнаходження локально на пристрої або віддалено через мережевий об'єкт. Однак існує безліч сценаріїв, в яких потрібне виявлення та локалізація пасивних об'єктів, наприклад, сканування навколишнього середовища, розпізнавання жестів та спостереження за зонами обмеженого доступу.

Виявлення пасивних об'єктів відноситься до сфери традиційних досліджень в галузі радіолокації. Протягом багатьох років радар використовувався в багатьох областях, включаючи керування рухом в аеропортах та морських портах, дистанційне сканування земної поверхні, високоточне виявлення невеликих деформацій поверхні, вимірювання обезліснення, а також моніторинг вулканів та землетрусів. Зовсім недавно тенденція змінилася, і тепер сюди додалися круїз-контроль та запобігання зіткненням, а також моніторинг стану здоров'я щодо серцебиття, дихання та руху голосових зв'язок людини. Оскільки подібні сенсори використовуються повсюдно, сценарії, в яких застосовується радар, перевершили всі очікування з того моменту, коли він був вперше розроблений та спроектований, наприклад, Google Soli [3]. Хоча 5G NR спочатку не підтримує радіолокаційне сканування із врахуванням конструкції системи, але все-таки проводиться значна кількість досліджень щодо використання існуючих стільникових сигналів для моностатичного або бістатичного виявлення цілей [4, 5]. Використання сигналів низхідної лінії передавання в LTE і NR для роботи радару передбачає дослідження проблеми повнодуплексного режиму моностатичної конфігурації.

Як правило, існують обмеження, пов'язані з прямим застосуванням фізичного сигналу традиційної стільникової системи (включаючи 5G NR) для сканування. Отже, опорні сигнали, що використовуються для оцінки каналу і відстеження фази в 5G NR, потенційно можуть бути повторно застосовані для сканування,

але при цьому, система не має в своєму розпорядженні достатніх ресурсів щодо спектра, часу або простору для виконання цієї операції з високою точністю і роздільною здатністю [6]. Це пов'язано з тим, що спектр є дуже обмеженим ресурсом для режиму зв'язку, а опорні сигнали ретельно розробляються для мінімізації накладних витрат. Крім того, режим передавання даних не потребує дуже точної оцінки довкілля. По-друге, пасивні бістатичні або мультистатичні системи радіолокації, що використовують стільникові сигнали, мають обмеження при проектуванні системи, через необхідність використання в пасивному радіолокаційному когерентному приймачу окремої спрямованої антени (прямий канал) для прийому сигналів прямої видимості в якості еталона синхронізації при когерентному детектуванні сигналів [7]. Проте насправді у багатьох випадках такого опорного сигналу LOS не існує через вплив шуму, завади і ефекти замирання. Ця проблема ще більше посилюється в процесі формування променя (цифрового та/або аналогового), який супроводжується випромінюванням різних сигналів з боку базової станції, що направляються користувачам у різних напрямках, і тому прийнятий відбитий сигнал може і не бути затриманою та ослабленою версією опорного сигналу LOS. В результаті когерентне детектування недоцільне, а пасивний радар працює непередбачувано. Крім того, хоча для зв'язку сигнал прямої видимості зазвичай корисний, але при цьому, вкрай важливо в пасивній радіолокаційній системі для визначення слабких ехо-сигналів від об'єктів спостереження придушувати сильний сигнал прямої видимості, що проникає в канал спостереження. Це робить набагато жорсткішими вимоги до динамічного діапазону пасивних радіолокаційних приймачів ніж для приймачів зв'язку. І останнє, але не менш важливе: у пасивній мультистатичній конфігурації системи немає взаємодії між вузлами Tx і Rx, що значно ускладнює зменшення завад та проведення когерентної обробки [8].

**Метою роботи** є підвищення ефективності використання телекомунікаційних систем за рахунок спільного застосування засобів зв'язку та сканування із найкращим компромісом між характеристиками сканування та пропускну здатністю каналу передавання.

### Виклад основного матеріалу

1. Формування зображень з високою роздільною здатністю з використанням радіочастотних сигналів (6G-візуалізація), що досягається за допомогою сканування, дозволяє отримати більше інформації про об'єкт і надати базові дані для класифікації та розпізнавання об'єктів [8]. Візуалізацію можна по суті змодельовувати як обернену задачу електромагнітного розсіювання [1]. В основі візуалізації лежить використання електромагнітних хвиль для опромінення об'єкту дослідження та відновлення інформації про об'єкт дослідження шляхом збирання розсіяних ехо-сигналів. Дослідження в галузі візуалізації можна розділити на дві категорії: 2D-візуалізація та 3D-томографія. Двовимірне зображення використовується для об'єктів із струмопровідних матеріалів, а тривимірна дифракційна томографія застосовується для діелектричних тіл, як показано на рис. 1. У традиційних системах візуалізації відстань між передавачем та об'єктом дослідження є зазвичай великою; тому модель 2D-зображення може бути спрощена як лінійна обернена задача в дальній зоні [2]. У тривимірній томографії необхідно вирішувати нелінійні обернені завдання для отримання кількісної інформації, такої як діелектрична проникність і провідність, які, у свою чергу, необхідно перетворити на результат візуалізації. Порівняно з 2D-візуалізацією, томографія складніша, оскільки ефект багаторазового розсіювання призводить до нелінійної проблеми візуалізації [2]. В останні роки запропоновано метод візуалізації з високою роздільною здатністю на основі множинних спостережень з використанням просторово-часового випадкового поля випромінювання [3]. Також було запропоновано когерентну модель візуалізації, засновану на теорії сприйняття компресії при туберкульозі кістки та обчисленні кореляції функції Гріна [4], в якій позиціонування об'єкту дослідження досягається за допомогою спеціально розробленої антени з метаматеріалу. З розвитком метаматеріалів і матеріалів, що налаштовуються, для досягнення підвищеної роздільної здатності точність цієї системи візуалізації може бути покращена.

У мережах 6G послугу сканування можна розглядати як паралельну задачу послугам зв'язку, оскільки вона може працювати та приносити дохід незалежно від основного призначення мережі. Це означає, що система повинна бути спроектована так, щоб легко переходити від простого обміну даними до суміщення сканування та обміну даними, задовольняючи таким чином KPI для обох послуг.

Рівень взаємодії між системами сканування та зв'язку можна розділити на такі категорії [5]: співіснування у випадку, коли дві системи розглядають одна одну як джерела завад і тому не обмінюються інформацією між собою; співпраці у випадку, коли дві системи розробляються окремо, проте вони обмінюються інформацією між собою з метою зменшення міжсистемних завад; спільне/інтегроване проектування у випадку, коли дві системи спроектовані так, щоб сформувати єдину уніфіковану систему.

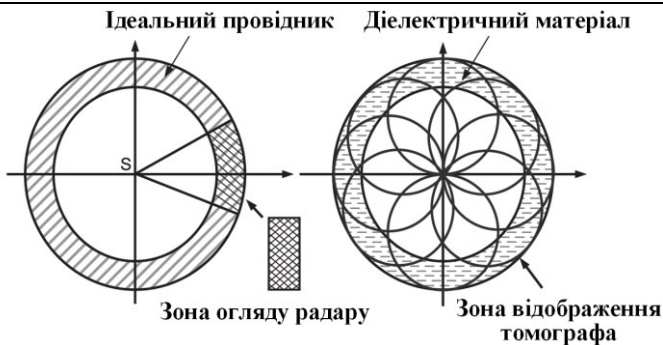


Рис. 1. Принцип спостереження за допомогою радарної візуалізації та томографії

Більшість досліджень, що стосуються інтегрованого проектування, здебільшого зосереджені на використанні спільної форми хвилі. Основною проблемою цього підходу полягає в тому, що зв'язок та сканування мають суперечливі KPI. Зокрема, розробки в галузі зв'язку в основному спрямовані на максимальне підвищення спектральної ефективності, тоді як оптимальна форма сигналу для сканування націлена на точні оцінки та високу роздільну здатність. Іншими словами, коли потрібна лише оцінка дальності, оптимальною формою сигналу зчитування є дельта-подібна функція автокореляції в часовій області поряд з високоефективною обробкою, що дозволяє оцінити параметр за наявності сильного шуму або інтерференції.

Хоча характеристика форми сигналу є важливим аспектом ISAC, але вона не охоплює всю картину. Тому пропонується здійснювати об'єднання схем сканування і зв'язку, яке виходить за рамки форми сигналу. В результаті, запропонована суперпозиція сигналів радару і зв'язку в області потужності та запропонований спільний метод в області потужності і просторової області. Однак майже вся існуюча література зосереджена на аспектах інтегрованого проектування на рівні каналів та не включає розгляд проблеми на рівні системи. Тому, результат проектування системної архітектури має гарантувати, що повна інтеграція систем зв'язку та сканування повністю реалізує очікувані переваги тієї та іншої послуги.

Мережі 6G мають працювати у більш високих частотних діапазонах з ширшою смугою пропускання (наприклад, на терагерцових частотах), а надмасивні антенні решітки стануть більш доступними. В результаті з'являється унікальна можливість розширити сферу застосування стільникових мереж від чистого зв'язку до комбінованої послуги зв'язку та сканування. При цьому, розробка мережі 6G повинна природним чином дійти інтегрованого рішення для зв'язку та сканування, на відміну від існуючого рішення, в якому основні компоненти (включаючи 5G NR, GNSS і радарні системи) працюють незалежно, як показано на рис. 2. Крім того, в результаті розвитку нових технологій і досягнень 6G (включаючи впровадження метаматеріалів, що реконфігуруються інтелектуальних антен та штучного інтелекту), таке інтегроване рішення буде ще більш виправданим, особливо з урахуванням того, що вказані технології є ключовими рушійними силами для обох систем.

Для розкриття величезного потенціалу нової технології ISAC, треба спочатку знайти відповіді на такі запитання: особливості співіснування модулів зв'язку та сканування в інтегрованому рішенні на системному рівні та способи підвищення ефективності співіснування на системному рівні; обґрунтування позитивного результату від інтегрованого системного рішення для послуг зв'язку та сканування; переваги та недоліки існуючих системах зв'язку та сканування із впровадженою інтеграцією на системному рівні.

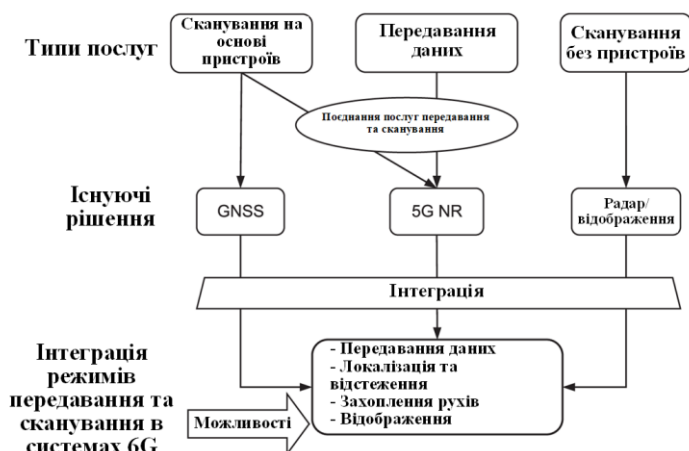


Рис. 2. Алгоритм функціонування інтегрованої системи сканування та зв'язку

Відповіді на ці запитання допомагають визначити нові потенційні напрямки досліджень. За допомогою рис. 3 можна дати просте пояснення інтеграції зв'язку та сканування.

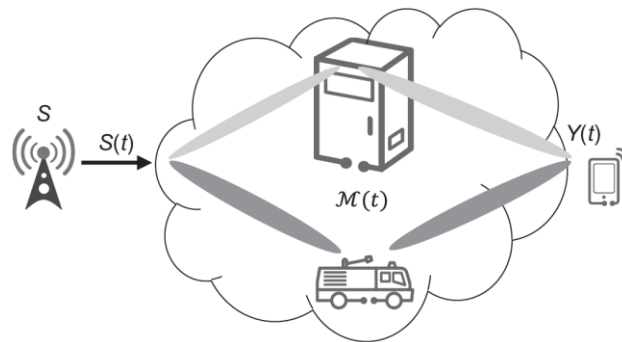


Рис. 3. Модель сегменту інтегрованої системи сканування та передавання даних

На схемі показаний радіочастотне джерело  $S$ , що передає сигнал  $S(t)$ , який поширюється через середовище зв'язку  $M$  і приймається або обробляється одним або декількома приймачами. При обміні даними радіочастотний сигнал  $S(t)$  спочатку обробляється в джерелі для внесення інформаційних даних ( $d_s$ ). Теоретичні межі швидкості передачі добре зрозумілі і можуть бути виражені як межа Шенона  $I(S(t); Y(t) | M(t))$ , де  $Y(t)$  позначає прийнятий сигнал на передбачуваному приймачі, а  $I(x; y | z)$  – взаємну інформацію між змінними  $x$  та  $y$ , що задана змінною  $z$ . Спочатку передбачалось, що це змінні є функціями часу ( $t$ ). Що стосується операції сканування, радіочастотний сигнал вносить зміни до середовища зв'язку, а не джерело сигналу. Іншими словами, потрібно розглядати сканування як особливий спосіб зв'язку, в якому інформація ( $d_M$ ), вбудована в середовище зв'язку та передається для приймача (приймачам) за допомогою радіочастотного сигналу, який може бути сформований третім пристроєм. В результаті, можемо визначити обмеження швидкості сканування як  $I(Y(t); M(t) | S(t))$  [6]. Іншими словами, ключова відмінність сканування від традиційного зв'язку від здійснення інтеграції джерела інформації та джерела радіочастотного сигналу.

При цьому, вважаємо, що сканування і зв'язок можуть бути представлені як загальна задача зв'язку, в якій вихідним сигналом можна керувати за допомогою вихідних даних ( $d_s$ ), або інформацією про середовище ( $d_M$ ). В результаті, отримуємо можливість визначення структури мережі ISAC, де вузли можуть виконувати обидві функції з наступними перевагами: більш ефективне використання ресурсів, оскільки інтегрована конструкція забезпечує ефективне спільне використання ресурсів, а не консервативний їх поділ (наприклад, FDMA та TDMA); зменшення завад між сигналами сканування та зв'язку, оскільки зрозуміло, що основною перевагою інтегрованої конструкції буде запобігання або зменшення завад між двома системами, коли вони спільно використовують ресурси в часовій, частотній або просторовій області; найкраща якість зв'язку, оскільки інтеграція дозволяє покращити якість зв'язку за двома напрямками. Перший напрямок передбачає підстроювання зв'язку під середовище за допомогою ефективніших методів формування діаграми спрямованості та зменшення завад завдяки отриманій інформації. Другий напрямок передбачає більш гнучкий і передбачуваний зв'язок, який працює в оптимальних умовах з використанням інформації про поточний і майбутній статус каналу. Цей підхід ґрунтується на знанні характеристик навколишнього середовища та прогнозуванні змін у ньому. Знаючи фактичне середовище передавання даних, можна визначити основну причину змін в інформації про стан каналу, без виконання спостереження за нею; мережа ISAC забезпечує більш ефективне сканування за запитом. Іншими словами, сканування більше не є лише послугою, що керується додатком, а може запускатися по запиту від іншого мережного вузла; менша споживана потужність, оскільки, якщо врахувати, що більша частина електроенергії у високочастотних системах розсіюється на аналоговому інтерфейсі (наприклад, підсилювачі потужності та АЦП/ЦАП), тому потужність може використовуватися набагато ефективніше, якщо системи хоча б частково інтегровані.

Основною проблемою при аналізі системи ISAC є знаходження меж швидкодії. Одним з важливих висновків при дослідженні структури ISAC в одноцільовій системі є те, що, оскільки повна енергія сигналу, що передається джерелом фіксована, необхідно знайти компроміс між відбитими і поглиненими хвилями. Запропонована структура ISAC є дуже обмеженим прикладом у тому сенсі, що при цьому враховується лише моностатичне сканування, тобто передавач та приймач сигналу сканування розташовані разом. Іншим добре відомим прикладом ISAC в парадигмі когерентного зв'язку є процес «оцінки каналу», в якому деякі «відомі» сигнали, які називають опорними сигналами або пілот-сигналами, передаються разом з сигналом, що несе інформацію, і приймачі сигналу зв'язку та сигналу сканування об'єднуються в спільний телекомунікаційний пристрій. У цьому випадку на радіочастотний сигнал, що передається, впливають як вихідна інформація, так і канал поширення. Однак цей приклад системи ISAC, в якому інформація сканування (про канал поширення) не має цінності сама по собі і використовується тільки для того, щоб допомогти приймачу декодувати вихідні дані. Загалом у рамках системи ISAC задача сканування розглядається як окрема послуга, яка не обов'язково використовується для покращення зв'язку. Навіть якщо процес сканування має покращити якість зв'язку, позитивний ефект від процесу сканування може виходити за межі вузького призначення.

У телекомунікаційній системі 6G використовуються передові технології для подальшого підвищення продуктивності мережі мобільного зв'язку. Деякі з цих технологій, що мають ключове значення для системи 6G і охоплюють кінцеві пристрої та мережну інфраструктуру, відкривають такі перспективи: ширший та високочастотний спектр із більшою смугою пропускання; удосконалена конструкція антени з дуже великими ґратками та метаповерхнею; більш узгоджена робота базових станцій та обладнання користувача; передові методи придушення завад; інтегрована вдосконалена обробка сигналів та штучного інтелекту (ШІ).

Розглянемо п'ять потенційних рівнів інтеграції ISAC. Перші два рівні стосуються спільного використання доступних фізичних ресурсів (включаючи спектр), обладнання та радіочастотних схем. На третьому рівні розглядається спільне використання ресурсів та можливостей цифрової обробки сигналів, таких як алгоритми та модулі обробки на фізичному рівні. Перехід на наступний рівень інтеграції може вимагати розробку інтерфейсу протоколу для забезпечення міжрівневого, міжмодульного та міжвузлового обміну інформацією. Нарешті, найбільш ефективний та ідеальний рівень передбачає спільне використання всіх доступних ресурсів та інформації для підвищення продуктивності обох служб. Таким чином, у мережі 6G можуть співіснувати різні рівні інтеграції відповідно до конкретних сценаріїв використання, ключових показників ефективності та витрат на реалізацію. Наприклад, для транспортних засобів з екстремальними вимогами до затримки зв'язку та ймовірності розпізнавання або виявлення об'єкта можуть знадобитися всі п'ять рівнів інтеграції.

Хоча ця багаторівнева структура може здатися простою в реалізації через очевидну схожість між послугами зв'язку та сканування, але для реалізації такої інтегрованої системи необхідно вирішити наступні основні проблеми: різні можливості вузлів, оскільки порівняно з 5G у бездротових мережах 6G буде ще більше бездротових вузлів з різноманітним набором можливостей у плані обробки сигналів, пам'яті, смуги пропускання та радіочастотного тракту. Це ускладнить інтеграцію порівняно із звичайним зв'язком, оскільки параметри вузла мають значно більший вплив на продуктивність сканування; напівдуплексні вузли, оскільки повнодуплексні приймачі вже прототиповані в існуючих системах з прийнятною продуктивністю і, як очікується, будуть комерціалізовані в найближчому майбутньому, але ще доведеться пройти довгий шлях, перш ніж у мережах будуть присутні тільки повнодуплексні вузли. Оскільки в майбутніх мережах залишиться велика кількість напівдуплексних пристроїв, тому напівдуплексні вузли ускладнюють сканування, особливо в моностатичному режимі, коли передавачі та приймачі розташовані поруч; обмежене покриття процесу сканування є одною з основних проблем сканування в мережах, яка полягає в тому, що дальність сканування збільшується як корінь четвертого ступеня з потужності передачі, а не другий, як у випадку зв'язку.

Наступні напрямки досліджень наблизять нас до інтеграції засобів зв'язку та сканування, зокрема: аналіз продуктивності узагальнених мереж ISAC а наявні висновки про фундаментальні межі продуктивності, отримані для простої структури бажано поширити на більш загальні варіанти багатовузлових багатоцільових мереж з мультистатичними сканування та знайти відповіді на такі питання: (1) який найкращий компроміс між характеристиками сканування та пропускнуою спроможністю каналу зв'язку; (2) як розробити практичні схеми, що наближають до такого компромісу, наприклад форми сигналів, таблиці кодування, структури та протоколи. Результати досліджень у цьому напрямі представлена в [7], де об'єкти сканування розглядаються як віртуальні приймачі енергії, а потім ISAC моделюється як завдання розподілу ресурсів інформації та енергії бездротовим каналом. З точки зору теорії інформації, сканованими об'єктами є радіорелейні станції, які приймають скануючий сигнал певної форми і пересилають його назад передавачу зі своєю власною інформацією про параметри середовища, що вбудовуються в хвилю відлуння. Необхідні додаткові підходи та ідеї, щоб отримати гарне уявлення про межі можливостей мереж ISAC у різних сценаріях; найбільш важлива проблема, яку необхідно вирішити, полягає в тому, як ця інтеграція впливає на конструкцію мережі радіодоступу на різних рівнях. Фізично при дослідженні знадобиться таке: архітектура мережі, що забезпечує гнучке і продуктивне співіснування між сигналами зв'язку та сканування, а також відповідними конфігураціями, тим самим гарантуючи, що робочі характеристики систем зв'язку та сканування не будуть погіршені; загальносистемні рішення для спільного використання скануючих можливостей різних вузлів, включаючи мережні вузли та пристрої користувача; механізми передачі сигналів, які формують взаємодію між мережевими об'єктами та забезпечують можливість проектування та налаштування пов'язаних параметрів; зв'язок за рахунок процесу сканування, оскільки в майбутньому сканування буде представлено як окрема послуга, все ж таки корисно дослідити, як інформацію, отриману за допомогою сканування, можна використовувати у зв'язку. Найбільш тривіальною перевагою сканування є визначення характеристик навколишнього середовища, що дозволяє організувати зв'язок по більш детермінованих і передбачуваних каналах завдяки знанням про середовище поширення. Приклади організації послуги зв'язку за рахунок процесу сканування показано на рис. 4, який демонструє, як знання про довкілля, отримані за допомогою сканування, можуть покращити зв'язок. Перший приклад відображає, як знання про довкілля використовуються для оптимізації формування променя в напрямку кінцевого пристрою (формування променя з урахуванням середовища), а другий приклад показує, як ці знання можуть бути використані для застосування всіх потенційних ступенів свободи в каналі поширення (підвищення рангу каналу з урахуванням середовища). Останній приклад показує, як поінформованість про середовище поширення допомагає зменшити або пом'якшити взаємні завади між кінцевими пристроями.



Ступінь, в якій процес сканування приносить користь системі в режимі зв'язку, не повинен обмежуватися покращенням пропускної спроможності та зменшенням завад. Окремий цікавий напрямок досліджень можна було б присвятити розширенню функціонального охоплення зв'язку за допомогою даних сканування та вивчення того, як функції, які зазвичай реалізуються системою зв'язку, можуть виконуватися підмодулем сканування. Результат спричинить величезну економію як з погляду накладних витрат, і з погляду затримки; інший погляд на парадигму конструкції ISAC передбачає використання альтернативного підходу до зв'язку за допомогою сканування. Як говорилося раніше, зв'язок і сканування можна розглядати як загальну платформу, в якій на радіосигнал від джерела в іншому місці накладаються дані про середовище, а потім він приймається третьою стороною. При такому підході немає необхідності обмежуватися спільним розміщенням джерел даних і радіосигналу, що буде особливо корисним в сценаріях, де для збору даних розгортаються пристрої з обмеженими можливостями обробки (більшість пристроїв IoT у майбутніх системах). Замість передачі зібраних даних пристрої можуть маніпулювати радіочастотним сигналом, що передається іншим джерелом радіочастотної області (на відміну від основної смуги частот), для економії значної кількості енергії. Цей тип зв'язку, поєднаний із функцією сканування, називається зв'язком із зворотним розсіюванням [8]. Іншим прикладом є зв'язок під впливом середовища [1], коли характеристики середовища проходження сигналу навмисно змінюються для передачі інформації; сканування за допомогою зв'язку, оскільки платформа зв'язку дозволяє нам досягати більш ефективного та інтелектуального сканування, з'єднуючи скануючі вузли між собою. У мережі підключених користувачів може бути реалізовано сканування на запит, тобто сканування може бути виконано на основі запиту іншого вузла або делеговано іншому вузлу. Крім того, спираючись на підтримку зв'язку, можна організувати спільне сканування, при якому кілька вузлів сканування отримують інформацію про довкілля. Всі ці розширені функції вимагають ретельно спроектованої RAN, щоб забезпечити зв'язок між скануючими вузлами каналами DL, UL і SL з вимогою на мінімальні витрати та максимальну ефективність сканування, що є цікавою темою дослідження; позиціонування за допомогою сканування: активна локалізація або позиціонування включає в себе локалізацію обладнання користувача за допомогою передачі або прийому сигналів до нього або від нього. Головною перевагою цього режиму є простота в експлуатації. Хоча точне знання розташування обладнання дуже цінується, його важко отримати через багато факторів, включаючи багатопроменеве поширення, недосконалу синхронізацію часу/частоти, обмежені можливості вибірки/обробки на стороні користувача і обмежений динамічний діапазон кінцевого пристрою [2].

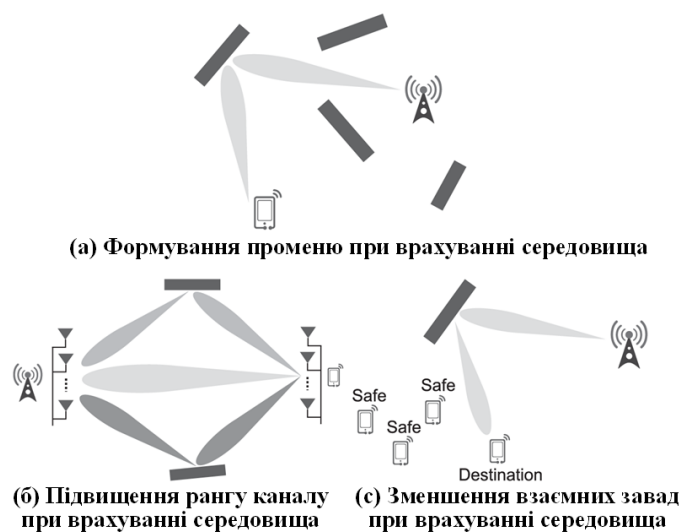


Рис. 4. Схема організації режиму зв'язку за допомогою процесу сканування

З іншого боку, пасивна локалізація включає отримання інформації про місцезнаходження активних або пасивних об'єктів шляхом обробки сигналів відлуння переданого сигналу в одному або декількох місцях. У порівнянні з активною локалізацією пасивна локалізація через сканування має такі явні переваги: вона допомагає у виявленні каналів LOS та зменшенні залишкового зміщення NLOS; на неї значно менше впливають помилки синхронізації між пристроєм користувача та мережею; вона може покращити роздільну здатність і точність позиціонування у випадках, коли смуга пропускання локалізації обмежена цільовим пристроєм користувача [3].

Зважаючи на ці моменти, потенційні дослідження можна зосередити на тому, як пасивна локалізація шляхом сканування усуває недоліки активної локалізації. Щодо пасивної локалізації, варто згадати проблему зіставлення (matching problem). Вона пов'язана з тим, що отримані сигнали відлуння не мають унікальної сигнатури, що дозволяє однозначно зіставити їх з об'єктами (і їх схованими змінними розташування), від яких вони відображаються. Це повністю відрізняється від локалізації з використанням активних сигналів або маяків, коли сигнатура, що відповідає маяку або орієнтиру однозначно ідентифікує

пов'язані з ними об'єкти. Тому потрібні подальші дослідження, щоб пов'язати спостереження з місцем розташування активних пристроїв, що істотно підвищить точність і роздільну здатність активної локалізації.

### Висновки

Розглянуто способи підвищення ефективності використання телекомунікаційних систем за рахунок спільного застосування засобів зв'язку та сканування із найкращим компромісом між характеристиками сканування та пропускну здатністю каналу передавання.

Отримані результати досліджень інтеграції засобів зв'язку та сканування, зокрема: аналіз продуктивності узагальнених мереж ISAC та висновки про фундаментальні межі продуктивності, отримані для простої структури дозволили визначити найкращий компроміс між характеристиками сканування та пропускну спроможністю каналу зв'язку, забезпечили можливість створити практичні схеми, що наближають до компромісу форми сигналів, таблиці кодування, структури та протоколів.

### Література

1. Barneto C. B., Riihonen T., Turunen M., Anttila L., Fleischer M., Stadius K., Ryyänen J., and Valkama M. Full-duplex OFDM radar with LTE and 5G NR waveforms: Challenges, solutions, and measurements, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 10, pp. 4042–4054, 2019.

2. Rao R. M., Marojevic V., and H J. Reed, Probability of pilot interference in pulsed radarcellular coexistence: Fundamental insights on demodulation and limited CSI feedback, *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 8, pp. 1678–1682, Aug. 2020.

3. Liu F., Masouros C., Petropulu A., Griffiths H., and Hanzo L. Joint radar and communication design: Applications, state-of-the-art, and the road ahead, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 6, pp. 3834–3862, 2020.

4. Dmytro V. Mykhalevskiy & Oksana S. Horodetska, 2019. Investigation Of Wireless Channels According To The Standard 802.11 In The Frequency Range Of 5 Ghz For Two Subscribers. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERC)*, Zibeline International Publishing, vol. 42(2), pages 50-57, March.

5. Васильківський М., Нікітович Д., Болдирева О. (2022). Керування доступом до інформаційних даних в інтелектуальних інфокомунікаційних мережах. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 5–17. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-1>

6. Васильківський М., Варгатюк Г., Болдирева О. (2022). Дослідження архітектури штучного інтелекту для інфокомунікаційних мереж 6G. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 62–70. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7>

7. Васильківський М., Коломієць А., Грабчак Н. (2022). Дослідження функціональних параметрів інфокомунікаційних мереж 6G. *Вісник Хмельницького національного університету*, (6), 46–52. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-46-52>

8. Васильківський М., Коломієць А., Будащ М. (2022). Оцінювання параметрів радіотрактів інфокомунікаційних систем 5G/6G. *Вісник Хмельницького національного університету*, (6), 53–60. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-53-60>

### References

1. Barneto C. B., Riihonen T., Turunen M., Anttila L., Fleischer M., Stadius K., Ryyänen J., and Valkama M. Full-duplex OFDM radar with LTE and 5G NR waveforms: Challenges, solutions, and measurements, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 10, pp. 4042–4054, 2019.

2. Rao R. M., Marojevic V., and H J. Reed, Probability of pilot interference in pulsed radarcellular coexistence: Fundamental insights on demodulation and limited CSI feedback, *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 8, pp. 1678–1682, Aug. 2020.

3. Liu F., Masouros C., Petropulu A., Griffiths H., and Hanzo L. Joint radar and communication design: Applications, state-of-the-art, and the road ahead, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 6, pp. 3834–3862, 2020.

4. Dmytro V. Mykhalevskiy & Oksana S. Horodetska, 2019. Investigation Of Wireless Channels According To The Standard 802.11 In The Frequency Range Of 5 Ghz For Two Subscribers. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments (JMERC)*, Zibeline International Publishing, vol. 42(2), pages 50-57, March.

5. Vasylykivskiy M., Nikitovych D., Boldyreva O. (2022). Keruvannya dostupom do informatsiinykh danykh v intelektualnykh infokomunikatsiinykh merezhakh. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 5–17. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-1>

6. Vasylykivskiy M., Varhatiuk H., Boldyreva O. (2022). Doslidzhennia arkhitektury shtuchnoho intelektu dlia infokomunikatsiinykh merezh 6G. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 62–70. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7>

7. Vasylykivskiy M., Kolomiiets A., Hrabchak N. (2022). Doslidzhennia funktsionalnykh parametriv infokomunikatsiinykh merezh 6G. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, (6), 46–52. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-46-52>

8. Vasylykivskiy M., Kolomiiets A., Budash M. (2022). Otsiniuvannya parametriv radiotraktiv infokomunikatsiinykh system 5G/6G. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, (6), 53–60. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-53-60>