

## УДК 621.391

М. В. Васильківський, О. С. Городецька, О. В. Стальченко, Б. С. Климчук

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ  
МЕРЕЖ МІМО НА ОСНОВІ 6G**

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**Анотація.** Визначено способи підвищення ефективності мереж радіодоступу 6G за рахунок нових принципів проектування та критеріїв оптимізації структури МІМО. Досліджена гнучка та універсальна мережа із можливістю розширення не тільки за рахунок досягнень в існуючих технологіях, а й за рахунок численних нових технологій, таких як ELAA, RIS, штучний інтелект, сканування, нових матеріалів, а також нових конструкцій та структур антен. Розглянуті технології нададуть універсальний набір інструментів збільшення пропускної здатності мережі. Досліджено досягнення в галузі радіочастотних компонентів, обробки сигналів та антенного зв'язку, які вплинуть на різні аспекти систем МІМО, включаючи модулятори, форми сигналів та конструкції приймачів. Розглянуті функціональні параметри трансиверів на основі електронних, фотонних та комбінованих технологій. Досліджено використання інтелектуальних радіоканалів, які значно покращують якість зв'язку, продуктивність системи, покриття стільника та якість зв'язку на межі стільника в бездротових мережах, що було доведено численними результатами моделювання у різних сценаріях. Визначено перспективний напрямок досліджень для надмасивних МІМО 6G, який є актуальним при використанні ґраток з надвеликою апертурою (ELAA). Визначено мету ELAA, яка полягає в тому, щоб всі користувачі використовували взаємно ортогональні канали з пропускною здатністю для кожного користувача, аналогічно каналу з адитивним гаусовим білим шумом. Досліджено інтелектуальний масивний МІМО в мережі 6G на основі ШІ, що забезпечує полегшення навчання та підвищує його ефективність. Розглянуто технологію ОАМ для високошвидкісної передачі на основі мультиплексування доступу з розділенням мод. Досліджено практичне застосування технології ОАМ при транзитній передачі між базовими станціями, передачі від пристрою до пристрою (D2D) та зв'язку між штучними супутниками, де відносно легко отримати необхідне вирівнювання осі. Здійснено аналіз розвитку технології МІМО враховуючи характеристики ТГц-каналу, зокрема виконано дослідження реконфігурованих інтелектуальних поверхонь, які характеризуються простотою апаратної архітектури, низькою апаратною складністю, низьким енергоспоживанням і високою ефективністю використання спектру. Визначено особливості створення антенних ґраток з надвеликою апертурою при застосуванні нових схем мультиплексування, використовуючи інформацію про просторову глибину для поділу потоків або обладнання за допомогою попереднього кодування. Здійснено підвищення ефективності МІМО з використанням штучного інтелекту, який здатний мінімізувати BER та підвищити спектральну ефективність масивного МІМО міліметрового діапазону та суттєво зменшуючи обчислювальну складність. Виконано дослідження альтернативних технологій МІМО.

**Ключові слова:** мережа радіодоступу 6G, штучний інтелект, пропускна здатність мережі, функціональний параметр трансиверу, бездротова мережа, канал з адитивним гаусовим білим шумом, інтелектуальний масивний МІМО, мультиплексування доступу з розділенням мод.

**Abstract.** Methods of increasing the efficiency of 6G radio access networks due to new design principles and optimization criteria of the MIMO structure have been determined. A flexible and versatile network with the possibility of expansion not only due to advances in existing technologies, but also due to numerous new technologies, such as ELAA, RIS, artificial intelligence, scanning, new materials, as well as new designs and structures of antennas, has been studied. The considered technologies will provide a universal set of tools for increasing network bandwidth. Advances in RF components, signal processing, and antenna communications that will affect various aspects of MIMO systems, including modulators, waveforms, and receiver designs, are explored. Functional parameters of transceivers based on electronic, photonic and combined technologies are considered. The use of intelligent radio channels, which significantly improve the quality of communication, system productivity, cell coverage, and the quality of communication at the cell boundary in wireless networks, was investigated, which was proven by numerous simulation results in various scenarios. A promising direction of research for super-massive MIMO 6G, which is relevant when using lattices with an extra-large aperture (ELAA), has been determined. The goal of ELAA is defined, which is that all users use mutually orthogonal channels with a per-user bandwidth similar to an additive Gaussian white noise channel. Intelligent massive MIMO in the 6G network based on AI has been studied, which facilitates learning and increases its efficiency. The OAM technology for high-speed transmission based on multiplexing access with mode separation is considered. The practical application of OAM technology in transit transmission between base stations, device-to-device (D2D) transmission, and communication between artificial satellites, where it is relatively easy to obtain the necessary axis alignment, has been studied. An analysis of the development of MIMO technology was carried out, taking into account the characteristics of the THz channel, in particular, a study of reconfigurable intelligent surfaces, which are characterized by the simplicity of the hardware architecture, low hardware complexity, low energy consumption and high efficiency of spectrum use, was carried out. The peculiarities of creating antenna arrays with an ultra-large aperture when applying new multiplexing schemes, using spatial depth information to separate streams or equipment using pre-coding, are determined. MIMO efficiency has been improved using artificial intelligence, which is capable of minimizing BER and increasing the spectral efficiency of massive MIMO of the millimeter range and significantly reducing computational complexity. A study of alternative MIMO technologies was carried out.

**Key words:** 6G radio access network, artificial intelligence, network bandwidth, transceiver functional parameter, wireless network, additive Gaussian white noise channel, intelligent massive MIMO, mode division access multiplexing.

**DOI:** <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-92-101>.

**Вступ**

Бездротовий зв'язок з кількома передаючими антенами, що перевершує можливості фазованих антенних решіток [1], став популярною темою досліджень наприкінці ХХ століття. Протягом цього періоду з'явилося безліч нових схем передачі та прийому, таких як просторово-часові блокові коди (STBC) [1], код Аламоуті [2], багатощаровий простір-час Bell Laboratories (BLAST) [3] та сферичне декодування [4]. Це значно покращило пропускну здатність каналу та надійність кількох передавальних антен.

Незабаром ці нові технології були впроваджені у 3GPP. Його перша версія (1G LTE) підтримувала до чотирьох портів передавальної антени на низхідному каналі, які могли бути ідентифіковані користувачами за допомогою опорних стільникових сигналів (CRS). Для задоволення постійно зростаючого попиту на ущільнення користувачів, пропускну здатність і надійність, разом з новими версіями

LTE поступово покращувалася і підтримка MIMO. Пізніше, при застосуванні нового радіоінтерфейсу, масивний MIMO спочатку підтримувався через архітектуру MIMO на основі променів, особливо в діапазонах TDD, які полегшили масове розгортання MIMO (через простіше отримання інформації про канал).

Для досягнення строгих ключових показників ефективності (KPI) мережі 6G повинні піддаватися ущільненню, що дозволяє розміщувати ширшу смугу пропускання у вузьких діапазонах та використовувати MIMO підвищеного порядку. Крім величезної кількості частотних ресурсів, терагерцовий MIMO сприятиме досягненню інших ключових показників ефективності 6G, таких як локалізація та сканування.

### **Актуальність**

Незважаючи на те, що в NR був досягнутий значний прогрес у підвищенні надійності та пропускнуої спроможності каналів MIMO, подальше вдосконалення для створення ще більш швидких та надійних каналів MIMO є бажаним та досяжним.

В даний час NR має широку підтримку MIMO як низько-, так і в середньочастотному діапазоні нижче 7,125 ГГц, відомому як частотний діапазон 1 (FR1) [1], а також у діапазонах високих частот від 24,250 до 52,6 ГГц (відомих як FR2) [2]. Однак подальша підтримка MIMO в епоху 6G пов'язана з низкою проблем. Наприклад, при збільшенні кількості антенних елементів, розгорнутих у кожному вузлі, і променів передачі/прийому також збільшуються витрати вимірювання радіосигналу, керування променем та отримання інформації про стан каналу.

### **Мета досліджень**

Мета статті є підвищення ефективності мереж радіодоступу 6G за рахунок нових принципів проектування та критеріїв оптимізації структури MIMO.

### **Постановка задач**

MIMO є одною з ключових технологій, яка дозволяє мережам 6G досягти цільових показників ефективності з точки зору користувальницької та мережевої пропускнуої спроможності, надійності, маневреності та енергозбереження. Успіх технології MIMO у мережах 6G залежить не тільки від удосконалень існуючих технологій 5G, а й від нових рішень. Зокрема, очікується, що майбутні системи MIMO включатимуть передові досягнення в галузі радіочастотних технологій, а також нові матеріали, архітектури антен та методи обробки сигналів. Розглянемо нові технології MIMO у 6G та їх можливості і проблеми.

Передбачається, що в мережах 6G відбудеться суттєве розширення діапазону спектру, в якому може працювати технологія радіодоступу. Спектральний діапазон охоплюватиме хвилі від менше 1 ГГц до міліметрових та терагерцеву частину спектру. Також у мережах 6G з'являться різні нові типи наземних та неназемних мережевих вузлів, включаючи супутники, NAPS, БПЛА та навіть RIS. З урахуванням цих змін MIMO в мережі 6G використовуватиме архітектуру наземного/повітряного мовлення, що охоплює всі частини відведеного спектру порівняно з традиційним наземним MIMO, встановленим на стаціонарних платформах.

Передбачено, що точки приймання-передавання (TRP) включатимуть різні типи антен, які можуть бути активними або пасивними, фіксованими або рухомими. Всі антени утворюють віртуальну велику антенну решітку, яка зможе інтелектуально та гнучко обслуговувати мобільних користувачів, задовольняючи вимоги KPI 6G. Така гнучка та універсальна мережа розширюється не тільки за рахунок досягнень в існуючих технологіях, а й за рахунок численних нових технологій, таких як ELAA, RIS, штучний інтелект, сканування, нові матеріали, а також нові конструкції та структури антен. Ці технології нададуть універсальний набір інструментів збільшення пропускнуої здатності мережі. Щоб скористатися цими технологіями з максимальною віддачею, необхідно прийняти нові принципи проектування та критерії оптимізації структури MIMO у мережах 6G, які будуть розглянуті в роботі. Враховуючи сказане, в даній статті розв'язуються такі задачі:

- аналіз розвитку технології MIMO враховуючи характеристики ТГц-каналу;
- дослідження реконфігурованих інтелектуальних поверхонь, які характеризуються простотою апаратної архітектури, низькою апаратною складністю, низьким енергоспоживанням і високою ефективністю використання спектру;
- особливості створення антенних ґраток з надвеликою апертурою при застосуванні нових схем мультиплексування, використовуючи інформацію про просторову глибину для поділу потоків або обладнання за допомогою попереднього кодування;
- підвищення ефективності MIMO з використанням штучного інтелекту, який здатний мінімізувати BER та підвищити спектральну ефективність масивного MIMO міліметрового діапазону та суттєво зменшуючи обчислювальну складність;
- дослідження альтернативних технологій MIMO.

### **Розвиток технології MIMO**

Постійно зростаючий попит на бездротові дані, що передаються зі швидкостями порядку Тбіт/с на короткі відстані, може бути задоволений тільки за рахунок використання широкого субТГц-спектру ча-

стот. На використання ТГц-спектру впливає безліч різних аспектів побудови мережі. Вивченню цих впливів присвячено багато досліджень [1, 2]. Смуга частот ТГц-діапазону займає діапазон між міліметровими хвилями та інфрачервоним світлом, які пов'язані з радіочастотними та оптичними пристроями відповідно. Досягнення в галузі радіочастотних компонентів, обробки сигналів та антенного зв'язку вплинуть на різні аспекти систем МІМО, включаючи модулятори, форми сигналів та конструкції приймачів. У нових трансиверах можуть використовуватися електронні, фотонні або комбіновані технології [2, 3]. Нова антенна технологія може використовувати решітки з активних та пасивних елементів для покращення формування діаграми спрямованості та покриття.

Між міліметровими хвилями та ТГц-діапазоном є багато спільного, що робить розгортання МІМО у цих частинах спектру схожим. Тому було б природно поширити рішення та архітектури міліметрового діапазону на терагерцевий діапазон. Однак існують важливі характеристики та практичні міркування щодо відмінностей цих двох діапазонів. До них відносяться: характеристики каналу, конструкція пристрою та генерація сигналів, а також антенна технологія [4].

Терагерцевим хвилям характерні високі втрати при поширенні в радіолінії. Визначено, що втрати на трасі збільшуються квадратично зі збільшенням несучої частоти у вільному просторі [2]. Крім цих величезних втрат у тракті передачі, з ТГц-хвилями пов'язані й інші проблеми, такі як низька ефективність підсилювачів потужності та проблеми, спричинені погодними умовами. Природні фактори, такі як молекулярне поглинання або сцинтиляція через тепло та вологість, обмежують використання ТГц-діапазону локальними сценаріями, такими як внутрішні мережі, розумні офіси та розумні фабрики [3]. Більше того, оскільки бездротові канали ТГц-діапазону практично не зазнають розсіювання, їх охоплення обмежене фізичними завадами, такими як стіни та стелі. Крім того, через незначну дифракцію хвиль бездротові канали складаються в основному з шляхів прямої видимості і, можливо, з кількох шляхів відображення, створюваних стінами або меблями.

Дуже широка смуга пропускання, доступна на частотах ТГц, пов'язана зі специфічними проблемами. Потужність теплового шуму лінійно пропорційна робочій смузі пропускання, що призводить до дуже низького співвідношення сигнал/шум навіть на середніх відстанях Tx-Rx [4]. Широкосмугові радіочастотні схеми дорожчі і потенційно розсіюють більше енергії, що призводить до ще нижчої енергоефективності терагерцевих трансиверів [5]. Структура решітки з антенних ґраток (AoSA) ТГц-трансиверів поряд з дуже широкою смугою пропускання призводить до явища відхилення або розщеплення променя [6]. Це виникає через необхідність підтримувати прийнятну апертуру антени. Розміри антеної панелі не можуть лінійно зменшуватися зі змінюючою смугою частот, тоді як тривалість імпульсів скорочується в міру збільшення доступної смуги пропускання. В результаті різні антенні елементи (що належать або до однієї, або до різних антенних ґраток) володіють різницею в часі проходження дистанції, що співрозмірна з тривалістю імпульсу або більшу за неї. Ця різниця в часі призведе до того, що промені в робочих частинах смуги пропускання будуть спрямовані в різних напрямках, як показано на рис. 1. Це явище відхилення призводить до того, що надзвичайно вузькі передавальні та приймальні промені поширюються у різних (і небажаних) напрямках. Можливим рішенням цього явища є використання попереднього кодування із затримкою [7].

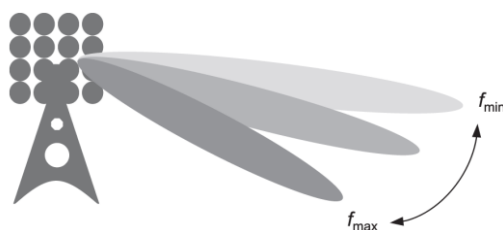


Рисунок 1 – Відхилення променя у ТГц-діапазоні

Іншою проблемою для терагерцевих ліній є непродуктивне навантаження пілот-сигналу та зворотного зв'язку, що необхідне для формування та підтримки пар променів між передавачем та приймачем.

Пошук променя вимагає сканування на обох кінцях бездротового зв'язку. Незначний рух або поворот з будь-якої сторони може призвести до втрати променя [4]. Отже, гнучке керування променем з низькими накладними витратами та високою надійністю є ключем до успіху розгортання мережі у ТГц-діапазоні. Хоча послідовне формування діаграми спрямованості залишається можливим рішенням для низьковитратного пошуку вузьких променів, але характеризується двома недоліками: дуже низьким бюджетом каналу на етапі пошуку широкого променя і великою затримкою через збільшення кількості вимірювань на кожному кроці. Така затримка та накладні витрати, якщо вони не будуть усунені, обмежать використання та переваги зв'язку у ТГц-діапазоні. Враховуючи проблеми з керуванням променем та інші

характеристики ТГц-каналу, для протоколів вищого рівня, таких як протоколи MAC, потрібні ефективніші рішення [1].

### Дослідження реконфігурованих інтелектуальних поверхонь

Інтелектуальні реконфігуровані поверхні (RIS) відносно недавно стали багатообіцяючою парадигмою проектування бездротових мереж і режимів бездротової передачі. Вони також можуть створювати інтелектуальні радіосередовища (або інтелектуальні радіоканали), тобто можна керувати поширенням радіохвиль у навколишньому середовищі для створення персоналізованого каналу зв'язку [5]. У узагальненій моделі, зображеній на рис. 2, мережа RIS формується між кількома TRP для створення великомасштабних інтелектуальних радіоканалів, які обслуговують кількох користувачів. При відсутності керованого середовища архітектура бездротової системи та режим передачі можуть бути оптимізовані лише відповідно до статистичних властивостей фізичних каналів та/або інформації, що повертається від приймача до передавача. У керованому середовищі RIS спочатку визначають дані середовища поширення і повертають в систему. Виходячи з цих даних, система оптимізує режим передачі та параметри RIS по інтелектуальних радіоканалах на стороні передавача, каналу та приймача.

Завдяки підтримці формування променя, пов'язаного з RIS, використання інтелектуальних радіоканалів може значно покращити якість зв'язку, продуктивність системи, покриття стільника та якість зв'язку на межі стільника в бездротових мережах, що було доведено численними результатами моделювання у різних сценаріях [6]. Не всі панелі RIS мають однакову структуру через їх різні можливості регулювання фази, які змінюють режим від плавного керування фазою до дискретного керування тільки з кількома рівнями. Дослідження показали, що при великій кількості блоків RIS обмежених регулюванням фаз на блок достатньо для значного покращення загальних характеристик системи [7].

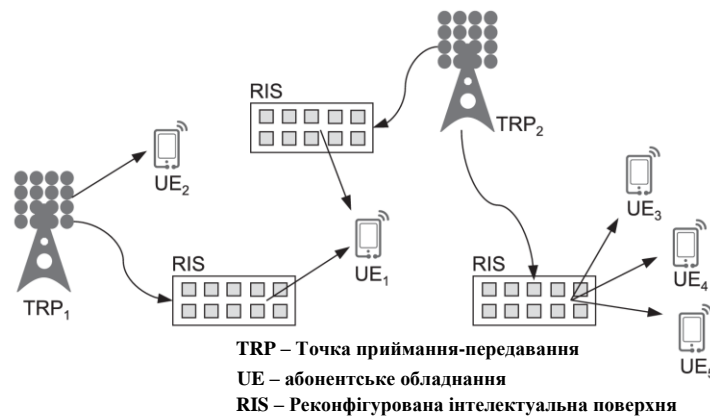


Рисунок 2 – Схема бездротової передачі з інтегрованими RIS

Іншим застосуванням RIS є передавачі, які безпосередньо модулюють властивості падаючих радіохвиль, такі як фаза, амплітуда, поляризація та частота, без необхідності в активних компонентах (як того вимагають радіочастотні схеми у традиційних передавачах MIMO) [2, 3]. Нещодавно було випробувано модуляцію 256QAM на основі RIS [4]. Передавачі на основі RIS мають багато переваг, такі як проста апаратна архітектура, низька апаратна складність, низьке енергоспоживання і висока ефективність використання спектру [2, 3]. Таким чином, RIS є новим напрямком у розробці передавачів в радіосистемах.

MIMO із підтримкою RIS має інші потенційні застосування, ніж ті, що ми вже обговорювали раніше. Наприклад, його можна використовувати для швидкого формування променя з використанням точного позиціонування або для подолання ефектів блокування за рахунок збору даних про канали в системі міліметрових хвиль [4]. Його також можна використовувати в NOMA для підвищення надійності при дуже низькому відношенні сигнал/шум, що дозволяє розмістити більше користувачів і використовувати схеми з модуляцією вищого порядку [3]. RIS також потенційно можуть бути використані для організації передачі з вбудованою фізичною безпекою, бездротової передачі енергії (або одночасної передачі даних та бездротової передачі енергії) та гнучких голографічних екранів [1-3].

### Особливості створення антенних ґраток з надвеликою апертурою

За останні 10 років були розроблені та протестовані різні пристрої, алгоритми та системні компоненти, що розширюють межі застосування MIMO. Перспективним напрямком досліджень для надмасивних MIMO 6G є особливості використання ґраток з надвеликою апертурою (ELAA).

ELAA можна характеризувати як ґратку, що складається з сотень антенних елементів, які спільно обслуговують розподілених користувачів. Кінцева мета ELAA полягає в тому, щоб всі користувачі вико-

ристовували взаємно ортогональні канали з пропускнуою здатністю для кожного користувача, аналогічною каналу з адитивним гаусовим білим шумом [4]. На додаток до розширення послуг мобільного широкопasmового зв'язку, що становлять велику частину бездротового трафіку [2], велику просторову роздільну здатність ELAA також можна використовувати для просторового мультиплексування великої кількості пристроїв зв'язку.

Значна кількість досліджень була зосереджена на пошуку нових алгоритмів, які відповідають особливим вимогам ELAA. Оскільки методи обробки MMSE можуть використовуватися для придушення міжстільникових завад, отже, ELAA може ефективно працювати при розгортанні в стільниках.

Дослідження ELAA виявило у них унікальні властивості, які значно відрізняються від традиційних масивних MIMO: при збільшенні розміру апертури решітки в ELAA хвильовий фронт стає відчутно сферичним і, отже, може бути апроксимований як плоска хвиля. Отже, при поширенні електромагнітного випромінювання починає переважати так зване ближнє випромінювальне поле. Використовуючи сферичну форму хвильового фронту, антена решітка може визначати не лише просторові кути хвилі, тобто кут приходу (AoA) та кут виходу (AoD), а й просторову глибину, яку пройшла хвиля. Ця нова функція додатково дозволяє застосовувати нові схеми мультиплексування, використовуючи інформацію про просторову глибину для поділу потоків або обладнання за допомогою попереднього кодування; у випадку коли апертура ґратки охоплює сотні довжин хвиль, бездротовий канал може стати нестационарним. Це означає, що розсіювачі видно лише частково або їх внесок у потужність може значно змінюватись по всіх ґратках. Нестационарність привносить у систему характерну розрідженість каналів, коли сигнал від будь-якого користувача з'являється лише у невеликій частині решітки. Подібна розрідженість каналів сприяє спрощенню схем обробки сигналів, таких як придушення завад від підрешітки, та методів передачі повідомлень. Тому, для покращення параметрів системи при розробці ELAA необхідно враховувати зазначені унікальні особливості.

### Ефективне MIMO зі штучним інтелектом

Завдяки своїй винятковій здатності отримувати характеристики з інформаційних даних машинне навчання стало багатобічним рішенням багатьох прикладних завдань, включаючи проблеми передачі на фізичному рівні [3]. Загалом машинне навчання можна використовувати для підвищення продуктивності існуючих алгоритмів, щоб наблизитися до оптимальної продуктивності алгоритму з меншою складністю. Його навіть можна використовувати для пошуку рішень шляхом моделювання завдань, які не можуть бути вирішені іншими способами.

Машинне навчання використовувалося у широкому спектрі додатків MIMO. Деякі типові приклади включають керування потужністю MIMO [1], детектування інформації про стан каналу [2], оцінку каналу [3], попереднє кодування MIMO [4] та детектування [5].

У машинному навчанні штучний інтелект вивчає основні характеристики цільового параметру на основі даних, які йому надали, а потім може застосувати ці знання до іншого завдання. Це можна розглядати як оновлення традиційних підходів до вирішення проблем, коли деякі параметри оптимізуються на основі спрощеної математичної моделі цільової характеристики. Подібні традиційні підходи обмежені точністю і складністю математичних моделей, які часто не можуть точно врахувати основні характеристики параметру, що розглядається. Як показують поточні дослідження, схеми MIMO зі штучним інтелектом завжди перевершують звичайні схеми. Наведемо приклади MIMO із використанням штучного інтелекту (ШІ). Отримання інформації про стан каналу за допомогою ШІ, де використовувалися пари мереж кодер/декодер для отримання більш ефективного зворотного зв'язку про стан каналу. Замість використання випадкової проєкції, кодер вивчає перетворення (від вихідних даних каналів до стислих уявлень) за допомогою навчальних даних. Тим часом декодер так само вивчає зворотне перетворення (із стислих уявлень у вихідні дані каналів). Згідно з результатами тестування, цей базований на даних метод може отримати більш точну оцінку каналу, ніж звичайні методи. Подальшого підвищення якості навчання можна досягти, якщо MIMO зі штучним інтелектом додатково використовуватиме моделювання алгоритмів у процесі навчання. Інтегруючи стратегії, засновані на моделях, у звичайне навчання на основі даних, можна досягти більш швидкої збіжності та більш точного висновку. Схема попереднього кодування за допомогою ШІ, де запропоновано засновану на глибокому навчанні структуру MIMO міліметрового діапазону для ефективного гібридного попереднього кодування. Цей підхід спрямований на те, щоб вийти за фундаментальні обмеження існуючих гібридних схем попереднього кодування. Ці обмеження включають високу складність та погане використання просторової інформації. У цьому дослідженні кожен з прекодерів, необхідних для отримання оптимізованого декодера, розглядається як відображення в глибоку нейромережу. Результати показують, що цей підхід здатний мінімізувати BER та підвищити спектральну ефективність масивного MIMO міліметрового діапазону, при цьому суттєво зменшуючи обчислювальну складність. Найкращі результати також спостерігаються під час детектування MIMO за допомогою машинного навчання. В результаті, запропоновано мережу глибокого навчання для високоякісного детектування MIMO. Звичайний детектор максимальної правдоподібності є оптимальним з погляду мінімізації ймовірності помилки при одночасному детектуванні символів, але має дуже високу

складність. Запропонована глибока нейромережа отримана з використанням методу прогнозованого градієнтного спуску. Моделювання показує, що ця мережа забезпечує майже оптимальні показники детектування – точність, аналогічну детектору максимальної правдоподібності, але при цьому більш ефективна і надійна; вона працює як мінімум у 30 разів швидше. Оцінка каналу MIMO за допомогою ШІ є актуальним завданням, оскільки швидке та якісне оцінювання каналу стає все більш складним завданням для стільникових мереж з масивним MIMO при збільшенні кількості антен. При цьому, запропоновано метод оцінки каналу на основі глибокого навчання для багатостільникових систем MIMO з обмеженими завданнями. Оцінювач використовує спеціально розроблену глибоку нейромережу. Запропонований метод включає лише два кроки: по-перше, шумопридушення прийнятого сигналу, а по-друге, оцінку каналу за допомогою звичайного алгоритму найменших квадратів. Моделювання доводить, що цей модуль оцінки може наблизитись до мінімальної середньоквадратичної помилки (MMSE) для сигналів великої розмірності, уникаючи при цьому складних перетворень каналів і не вимагаючи визначення коваріаційної матриці каналу. Ця оцінка також стійка до зашумлення пілотного сигналу і за певних умов може його повністю усунути.

Виходячи із значних покращень показників системи, зафіксованих у ході поточних досліджень, передбачено, що ШІ зумовлює забезпечення більш надійного та ефективного MIMO у 6G. Однак, перш ніж ШІ можна буде широко застосовувати в системах MIMO, необхідно вирішити різні проблеми. По-перше, існуючі проекти MIMO зі штучним інтелектом можуть навчатися на вхідних даних, але погано узагальнюються на модифікований розподіл чи нестационарність. Недостатнє використання знань є ще одним ключовим недоліком поточних моделей MIMO з використанням штучного інтелекту. Крім того, неадекватне вилучення даних може обмежити ефективність та точність алгоритмів MIMO з використанням штучного інтелекту. Всі перераховані фактори ускладнюють досягнення балансу між витратністю навчання і точністю виведення в MIMO широкого застосування з використанням ШІ.

Завдяки своїй чудовій здатності до узагальнення, точного визначення ознак і високого паралелізму ШІ може покращити показники систем MIMO. Але насамперед ШІ має сприяти впровадженню MIMO у 6G, зокрема допоможе впоратися з великими розмірами решітки та все більш різноманітними мережевими сценаріями. Основними проблемами при збільшенні розмірів решітки в пристроях 6G є високопродуктивне логічне виведення каналів, попереднє кодування/формування діаграми спрямованості та схеми детектування. Отже, незалежно від використання SU-MIMO, MU-MIMO або відстеження променя робота MIMO залежить від високоточного детектування CSI та подальшого попереднього кодування. Однак досягнення високоточного попереднього кодування стає все складнішим завданням. Частково це пов'язано з різким збільшенням обсягу потрібних обчислень. Аналогічні проблеми виникають під час детектування MIMO. Для вирішення цих проблем при проектуванні MIMO за допомогою ШІ, необхідно приділяти увагу збору та використанню даних, розвитку теорії навчання та новаторським схемам для різних сценаріїв MIMO. Розглянемо такі рішення докладніше.

Розвинені та опрацьовані схеми збору, перевірки та використання даних мають вирішальне значення для забезпечення точного засвоєння (потенційно) величезних обсягів даних, що надаються приймальними пристроями та датчиками у системах 6G. Ці дані дозволяють ШІ робити прямі або опосередковані висновки та прогнозувати відповідну інформацію для отримання CSI, керування променем, мобільності, передачі обслуговування, кешування (наприклад, дальність дії пристрою, швидкість та орієнтація), доплерівський зсув, AoA та AoD. Отже, при отриманні CSI, завдяки великій кількості даних, що надаються пристроями та датчиками, ШІ може отримувати більше корисних характеристик з інформації про кут та відстань, щоб відновити або спрогнозувати CSI.

Подальші дослідження в галузі теорії навчання та виведення дозволять реалізувати більш точні та ефективні проекти MIMO за допомогою ШІ. Наприклад, вивчення інтерпретованості глибоких нейромереж, ймовірно, допоможе нам розробити методологію вибору правильної моделі ШІ та її подальшого ефективного навчання, що послужить фундаментом для створення вбудованого ШІ. Покращуючи способи повторного використання та розбиття на модулі попередньої інформації, що надається шляхом сканування, можна покращити навчання та логічне виведення ШІ MIMO на основі моделей та даних, а у свою чергу навчання на основі моделей та даних покращить показники системи MIMO з точки зору точності прогнозування та накладних витрат на навчання (наприклад, обсяг навчальних даних та час).

Грунтуючись на внутрішніх відмінностях між традиційними рішеннями MIMO на основі моделей та схемами, що залежать від даних, MIMO за допомогою ШІ внесе фундаментальні зміни до традиційної структури MIMO. Зокрема, системи на основі автоенкодерів можуть ефективно замінити традиційні складні канали. Схема модуля фізичного рівня для наскрізного каналу E2E має бути розрахована на спільну оптимізацію приймачів. Враховуючи потенційно величезні обсяги даних та очікуваний розвиток теорії машинного навчання, можна припустити, що MIMO за допомогою ШІ стане невід'ємною рисою 6G. Наведемо принципи проектування та можливі напрямки досліджень для MIMO з підтримкою штучного інтелекту.

Завдяки використанню штучного інтелекту МІМО у мережах 6G повинен мати надзвичайно низькі накладні витрати на вимірювання каналу, зворотний зв'язок, керування променем та демодуляцію даних. Завдяки своїм вражаючим аналітичним здібностям ШІ може повністю дослідити внутрішню структуру багатовимірних каналів та проводити надзвичайно ефективні вимірювання. Використовуючи свою здатність до висновків з використанням часової кореляції, ШІ може додатково покращити поточні (або навіть майбутні) вимірювання на основі даних попередніх вимірювань. В результаті, незалежно від того, яку форму має антена, виведення каналу буде реалізовано в системах МІМО з надзвичайно низькими витратами пілот-сигналу. Це можливо завдяки здатності ШІ розуміти внутрішню структуру каналів. ШІ також може брати участь у інтелектуальному формуванні променя. На основі штучного інтелекту можна побудувати більш ефективну, інноваційну та менш складну систему керування променем.

Використовуючи складні логічні та обчислювальні можливості ШІ можна ефективно вирішити кілька традиційних проблем з вузькими місцями МІМО (наприклад, детектування МІМО, керування завданнями та розподіл ресурсів), щоб наблизитися до теоретичних меж продуктивності. Отже, детектування за принципом максимальної правдоподібності може забезпечити оптимальну роботу з існуючими детекторами; проте при збільшенні кількості змінних, що визначають рішення, його складність зростає експоненційно. Незважаючи на великий інтерес до реалізації неоптимальних алгоритмів детектування, сучасні алгоритми страждають від проблем із надійністю та затримкою. Вивчаючи правила детектування на основі даних, ШІ може надати новий підхід для досягнення майже оптимального детектування з меншою складністю.

Штучний інтелект добре відомий своїм точним визначенням параметрів із різних типів даних. За наявності достатньої кількості навчальних даних ШІ може отримати ефективніші уявлення CSI. Для прикладу області, яка може бути покращена, можна назвати детектування CSI NR, яке завжди використовує просту модель відображення і квантування, що призводить до відносно поганого використання розріджених ознак. З іншого боку, ШІ забезпечує більш точне визначення ознак CSI з даних за рахунок використання методів, що залежать від даних, для створення ефективніших уявлень CSI. Крім того, завдяки різноманітності даних із зовнішніх пристроїв також може бути гарантована універсальність.

Для отримання справді інтелектуального масивного МІМО в мережі 6G необхідно розробити більш надійний, ефективніший і простіший у реалізації МІМО за допомогою ШІ. Для досягнення цієї мети слід використовувати зрозумілий ШІ, що забезпечить полегшення навчання та підвищить його ефективність. Для забезпечення покращеної та диференційованої взаємодії з користувачем потрібна структура, націлена на пріоритет користувача. Нарешті, для надійного навчання ШІ в наскрізному каналі E2E всі структури і рішення повинні мати двоспрямованість.

### Альтернативні технології МІМО

У 2007 році Бо Тіде та ін розширили концепцію ОАМ (кутовий момент електромагнітного променя) на радіочастоті, що призвело до появи радіочастотного ОАМ (далі - ОАМ) [3]. Форми електромагнітних хвиль, що несуть моди ОАМ, які називають променями ОАМ, можна розділити на кілька типів, наприклад гаусовий промінь, промінь Лагера-Гауса, промінь Бесселя і Бесселя-Гауса. В бездротовому зв'язку, в галузі радіочастот, промені ОАМ збільшують нестационарність бездротових каналів і вносять спіральну фазову структуру в радіальний напрямок поширення. Попередні дослідження підтвердили здійсненність ОАМ як з теоретичної [4], так і з практичної [5] точки зору.

Класичні методи приймання на основі ОАМ-мультиплексування наведені в табл. 1. Для адаптації ОАМ до великих відстаней та повільної мобільності були запропоновані методи на основі двовимірних кругових решіток з керованим променем [4], метод псевдодоплерівської інтерполяції [5], метод відбитків електромагнітного поля [6] та метод модульного сталого фазового градієнта [7].

Всі поточні дослідження вказують на ОАМ як на ефективний метод використання просторової області, особливо коли передавач і приймач знаходяться в ближньому полі, тобто ближче, ніж відстань Релея (визначена в даному випадку як осьова відстань з різницею фаз  $\pi/8$  між осьовим та крайовими променями) [2]. Для отримання вигоди від просторового рознесення в умовах динамічного каналу з використанням уніфікованого обладнання запропоновано інтегровану структуру ОАМ плюс МІМО, яку називають також багаторежимно-багатопросторовою (MOMS) [3].

До недоліків використання променів ОАМ можна віднести: відсутність можливості сформувати новий незалежний ступінь свободи в системі бездротового зв'язку і неможливість підвищення пропускну здатності МІМО за рамки традиційної з тим самим каналним середовищем. Отже, технологія ОАМ не може підвищити ефективність використання спектру систем МІМО у класичних сценаріях бездротового зв'язку, таких як мережі мобільного радіодоступу. Проте в деяких сприятливих сценаріях (наприклад, мікросотах і малих сотах всередині приміщень) ОАМ може забезпечити підвищену ефективність використання спектру у порівнянні із системами МІМО з простими і неоптимальними декодерами. Це пов'язано з тим, що множинні моди ОАМ покращують позиційне число (condition number) каналу.

Таблиця 1 – Класичні методи приймання на основі ОАМ-мультиплексування

Метод приймання	Апертура приймальної антени
Скалярно-фазовий градієнт	Повна
Спектральний аналіз	Повна
Просторове співвідношення на основі нейромережі	Повна
Скалярно-фазовий градієнт	Часткова
Векторно-фазовий градієнт	Часткова
Псевдодоплерівський	Часткова

Незважаючи на ці недоліки, існує подвійна кінцева вигода від впровадження передачі ОАМ. По-перше, коли канал задовольняє параксильному обмеженню та умові LOS, інформація, що переноситься ортогональними променями ОАМ, може бути ефективно демультимплексована без складного післяоброблення сигналу, як показано на рис. 3. Ця низька складність обробки має велике значення для надвисокої швидкості бездротового зв'язку (наприклад, пропускна здатність Тбіт/с у міліметрових та ТГц-діапазонах). По-друге, промені ОАМ можна розглядати як спеціальний метод просторової фільтрації, який можна комбінувати з обробкою сигналів МІМО для отримання гнучкого компромісу між мультиплексуванням та вирашем від рознесення у більш загальних умовах каналу [4]. Така комбінована схема особливо підходить для антенних решіток міліметрового діапазону на малих відстанях.

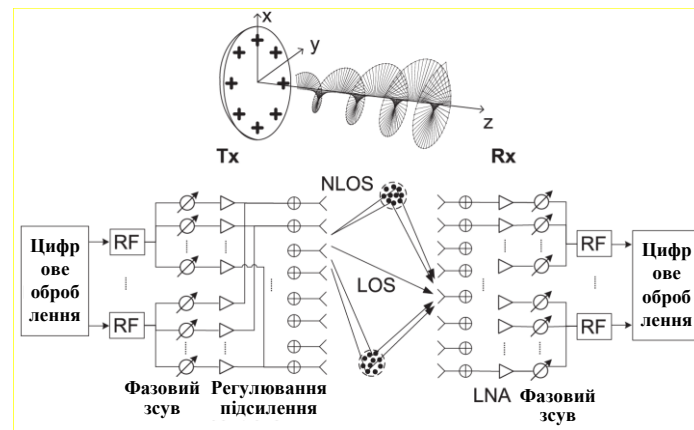


Рисунок 3 – Система бездротового зв'язку на основі ОАМ

На практиці технологію ОАМ можна використовувати для високошвидкісної передачі шляхом введення мультиплексування доступу з розділенням мод. Зокрема, її можна використовувати при транзитній передачі між базовими станціями, передачі від пристрою до пристрою (D2D) та зв'язку між штучними супутниками, де відносно легко отримати необхідне вирівнювання осі.

Теоретична ємність систем потужних МІМО зростає зі збільшенням кількості антен. Це означає, що теоретично завжди краще мати більше антен, а оптимальна кількість є нескінченно великою [3]. Однак на практиці виникають проблеми із постійним збільшенням кількості антен. Наприклад, одна проблема полягає в тому, як реалізувати дуже велику кількість антен в обмеженому просторі у формі просторово безперервної апертури передачі/приймання. Іншою проблемою є обмеження пропускної спроможності МІМО при розгляді електромагнітного ефекту між щільно розташованими антенами. Дослідження, спрямовані на вирішення таких проблем, стосуються категорії досліджень голографічного МІМО (Ноло-МІМО). Однак подібне дослідження отримало кілька інших назв, включаючи дослідження голографічного радіо, голографічних радіочастотних систем [4] або навіть голографічного масивного МІМО та голографічного формування променю [5].

Ноло-МІМО визначається як єдина форма просторово-обмеженої системи із множиною антен, в якій кількість антен може необмежено зростати при збереженні обмеженого розміру апертури (тобто приблизно безперервної апертури). Ця конструкція заснована на принципах, протилежних конструкції E-LAA, де висока глибина різкості досягається за рахунок збільшеної апертури решітки антени. Однією з потенційних переваг системи Ноло-МІМО є те, що безперервна апертура може забезпечити підвищену просторову роздільну здатність у бездротовому зв'язку, ніж дуже велика кількість звичайних дискретних антен. Ще одна перевага полягає в тому, що безперервна апертура дозволяє створювати та приймати електромагнітні хвилі з довільними просторово-частотними компонентами без небажаних бічних пелюсток.

При дослідженні ступенів свободи суцільних та обмежених апертур було показано, що глибина різкості лінійно залежить від добутку розміру апертури та кутового розкиду згідно з випадковим поширенням поза прямою видимістю (NLOS). Тому об'ємні апертури можуть асимптотично призводити до дворазового збільшення доступної глибини різкості порівняно з плоскими апертурами, незалежно від того, наскільки тонкими є об'ємні апертури. Для досягнення вираженого ефекту надрознесення може бути використане взаємне зв'язування близько розташованих антен за допомогою попереднього кодування.

Призначенням голографічного радіо є створення активної безперервної електромагнітної апертури, яка забезпечить просторове мультиплексування на рівні голографічних зображень надвисокої щільності та пікселізації з надвисокою роздільною здатністю. Просторовий синтез та модуляція поля радіочастотної хвилі дозволяють отримати тривимірне електромагнітне поле, структуроване на рівні пікселів (простір мультиплексування з високою щільністю в голографічному радіо), яке відрізняється від розрідженого простору променя, пов'язаного з традиційним масивним MIMO. В результаті, формування зображення з голографічною інтерференцією може бути використане для отримання спектральної голограми радіопередавальних джерел (примосування користувача). У такому випадку є можливість уникнути необхідності у звичайних процедурах передачі пілот-сигналу та оцінки стану каналу.

Однією із проблем голографічних радіосистем є вартість реалізації активних безперервних апертур. При цьому, можливе рішення об'єднати велику кількість антенних елементів у компактний простір як метаповерхні. Однак цей метод обмежений пасивним відображенням через властивості метаповерхні. Тому він не підходить для активних ґраток. Альтернативним (і більш перспективним) рішенням є використання жорстко пов'язаних ґраток (ТСА) ширококугових антен. Ця технологія заснована на токовій пластині фотодетекторів з одностороннім рухом носіїв (UTC-PD), де ущільнена високочастотна мережа живлення замінена волоконно-оптичними лініями, перевагами яких є низька вартість і мале енергоспоживання [6].

Іншою проблемою голографічного радіо є складність обробки сигналів, що виникає внаслідок величезної кількості даних, що генеруються майже нескінченною кількістю антенних елементів усередині безперервної апертури. Одним з рішень є перетворити радіосигнали на оптичні та обробляти їх безпосередньо в оптичній галузі, де можливі підвищення швидкості обробки та менше енергоспоживання. Перетворення на оптичні сигнали може бути досягнуто за допомогою оптичного швидкого перетворення Фур'є [7].

Точні переваги упаковки більшої кількості антен в апертурі обмеженого розміру залишаються неясними. Поточні дослідження показують, що глибина різкості досі обмежена розміром апертури. Через відсутність моделей голографічне радіо потребує особливої теорії та техніки моделювання для зближення теорій зв'язку та електромагнетизму. В результаті, оцінка показників зв'язку Holo-MIMO вимагає спеціальних обчислень у галузі електромагнетизму, таких як алгоритми та інструменти моделювання, пов'язані з обчислювальним електромагнетизмом та комп'ютерною голографією.

### Висновки

Здійснено аналіз розвитку технології MIMO враховуючи характеристики ТГц-каналу, зокрема виконано дослідження реконфігурованих інтелектуальних поверхонь, які характеризуються простотою апаратної архітектури, низькою апаратною складністю, низьким енергоспоживанням і високою ефективністю використання спектру. Визначено особливості створення антенних ґраток з надвеликою апертурою при застосуванні нових схем мультиплексування, використовуючи інформацію про просторову глибину для поділу потоків або обладнання за допомогою попереднього кодування. Здійснено підвищення ефективності MIMO з використанням штучного інтелекту, який здатний мінімізувати BER та підвищити спектральну ефективність масивного MIMO міліметрового діапазону та суттєво зменшуючи обчислювальну складність. Виконано дослідження альтернативних технологій MIMO.

### Список літератури

- [1] Y. Yifei, Z. Yajun, Z. Baiqing, and P. Sergio, "Potential key technologies for 6G mobile communications", in *SCIENCE CHINA Information Sciences*, Springer, vol. 63, pp. 1–19. 2020.
- [2] E. Balevi, A. Doshi, and J. G. Andrews, "Massive MIMO channel estimation with an untrained deep neural network", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 2079–2090. 2020.
- [3] H. He, C.-K. Wen, S. Jin, and G. Y. Li, "Model-driven deep learning for MIMO detection", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 68, pp. 1702–1715. 2020.
- [4] Y. Yuan, Y. Zhao, B. Zong, and S. Parolari, "Potential key technologies for 6g mobile communications", *Science China Information Sciences*, vol. 63, pp. 1–19. 2020.
- [5] Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. А. Чолоян, "Спектральний метод оцінювання джитеру в телекомунікаційних системах", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2, с. 109–114. 2010.

- [6] Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, В. М. Кичак, *Методи та засоби підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах: Монографія*. Вінниця: ВНТУ, 2015. 140 с.
- [7] Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський, О. В. Стальченко, "Пристрій аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів", *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, № 2, с. 82–85. 2013.

Стаття надійшла: 25.12.2023.

#### References

- [1] Y. Yifei, Z. Yajun, Z. Baiqing, and P. Sergio, "Potential key technologies for 6G mobile communications", in *SCIENCE CHINA Information Sciences*, Springer, vol. 63, pp. 1–19. 2020.
- [2] E. Balevi, A. Doshi, and J. G. Andrews, "Massive MIMO channel estimation with an untrained deep neural network", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 2079–2090. 2020.
- [3] H. He, C.-K. Wen, S. Jin, and G. Y. Li, "Model-driven deep learning for MIMO detection", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 68, pp. 1702–1715. 2020.
- [4] Y. Yuan, Y. Zhao, B. Zong, and S. Parolari, "Potential key technologies for 6g mobile communications", *Science China Information Sciences*, vol. 63, pp. 1–19. 2020.
- [5] G. G. Bortnyk, M. V. Vasykivskyi, V. A. Cheloyan, "Spectral method of jitter estimation in telecommunication systems", *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, no. 2, pp. 109-114. 2010 [in Ukrainian].
- [6] G. G. Bortnyk, M. V. Vasykivskyi, V. M. Kychak, *Methods and means of increasing the efficiency of evaluating the phase jitter of signals in telecommunication systems: Monograph*. Vinnytsia: VNTU, 2015. 140 p. [in Ukrainian].
- [7] G. G. Bortnyk, M. V. Vasykivskyi, O. V. Stalchenko, "Device for analog-digital conversion of high-frequency signals", *Measuring and computing equipment in technological processes*, no. 2, pp.82–85. 2013 [in Ukrainian].

#### Відомості про авторів

**Васильківський Микола Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій.

**Городецька Оксана Степанівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки.

**Стальченко Олександр Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій.

**Климчук Богдан Сергійович** – студент групи ТКС-21м, кафедра інфокомунікаційних систем і технологій.

M. V. Vasykivskyi, O. S. Horodetska, O. V. Stalchenko, B. S. Klymchuk  
**INCREASING THE EFFICIENCY OF MIMO 6G SMART NETWORKS**

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

#### ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Найновіші правила оформлення і подання статей знаходяться на сайті журналу  
<http://itce.vntu.edu.ua/>