

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-317-1-26-32>

УДК 621.391

ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ Микола

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>

e-mail: mvasylkivskiy@gmail.com

ВАРГАТЮК Ганна

Вінницький національний технічний університет

e-mail: annaantonuik@gmail.com

БОЛДИРЕВА Ольга

Вінницький національний технічний університет

e-mail: rtt13bpoludenko@gmail.com

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ РАДІОІНТЕРФЕЙС З ПІДТРИМКОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Досліджено особливості впровадження інфраструктури інтелектуального радіоінтерфейсу 6G, яка буде використовувати індивідуальну конфігурацію для кожного окремого абонентського застосунку та гнучкі послуги з меншими накладними витратами. Розглянуто персоналізовану інфраструктуру, яка складається з інтелектуального фізичного рівня з підтримкою штучного інтелекту, інтелектуального контролера MAC та інтелектуального протоколу, за яким слідує потенційно новий пристрій наскрізного каналу (E2E) на основі штучного інтелекту.

Визначено вимоги до мережі 6G, які передбачають створення єдиної мережі з функціями сканування та зв'язку, які повинні бути інтегровані в єдину структуру на етапі проектування радіоінтерфейсу. Досліджено особливості ретельного проектування мережі зв'язку та сканування, яка буде пропонувати повні можливості сканування, а також повніше відповідати всім ключовим показникам ефективності в галузі зв'язку.

Ключові слова: інтелектуальний радіоінтерфейс, ключовий показник ефективності, мережа радіодоступу, штучний інтелект, інтелектуальний контролер, канал передавання даних.

VASYLKYVSKYI Mikola, VARGATYUK Ganna, BOLDYREVA Olga
Vinnytsia National Technical University

INTELLIGENT RADIO INTERFACE WITH THE SUPPORT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The peculiarities of the implementation of the 6G intelligent radio interface infrastructure, which will use an individual configuration for each individual subscriber application and flexible services with lower overhead costs, have been studied. A personalized infrastructure consisting of an AI-enabled intelligent physical layer, an intelligent MAC controller, and an intelligent protocol is considered, followed by a potentially novel AI-based end-to-end (E2E) device. The intelligent controller is investigated, in particular the intelligent functions at the MAC level, which may become key components of the intelligent controller in the future. The joint optimization of these components, which will provide better system performance, is considered. It was determined that instead of using a complex mathematical method of optimization, it is possible to use machine learning, which has less complexity and can adapt to network conditions. A 6G radio interface design based on a combination of model-driven and data-driven artificial intelligence is investigated and is expected to provide customized radio interface optimization from pre-configuration to self-learning. The specifics of configuring the network scheme and transmission parameters at the level of subscriber equipment and services using a personalized radio interface to maximize the individual user experience without compromising the throughput of the system as a whole are determined.

Artificial intelligence is considered, which will be a built-in function of the radio interface that creates an intelligent physical layer and is responsible for MAC access control, network management optimization (such as load balancing and power saving), replacing some non-linear or non-convex algorithms in receiver modules or compensation of shortcomings in non-linear models. Built-in intelligence has been studied, which will make the 6G physical layer more advanced and efficient, facilitate the optimization of structural elements of the physical layer and procedural design, including the possible change of the receiver architecture, will help implement new detection and positioning capabilities, which, in turn, will significantly affect the design of radio interface components. The requirements for the 6G network are defined, which provide for the creation of a single network with scanning and communication functions, which must be integrated into a single structure at the stage of radio interface design. The specifics of carefully designing a communication and scanning network that will offer full scanning capabilities and more fully meet all key performance indicators in the communications industry are explored.

Keywords: intelligent radio interface, key performance indicator, radio access network, artificial intelligence, intelligent controller, data transmission channel.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

При проектуванні мережі радіодоступу 5G розробники орієнтувалися на концепцію ІоЕ, яка знайшла втілення у різних сценаріях використання, таких як eMBB, URLLC та mMTC. При цьому, було враховано три типові вимоги для цих сценаріїв: швидкість передачі даних 20 Гбіт/с при смузї пропускання 100 МГц, надійність 99,999% при затримці радіоінтерфейсу 1 мс та 1 млн пристроїв на квадратний кілометр з ширшим покриттям відповідно [1].

Для реалізації оптимізованого методу підтримки універсальних сценаріїв застосування та широкого спектрального діапазону в 5G застосували новий уніфікований радіоінтерфейс, що має як гнучкість, так і адаптованість. Цей радіоінтерфейс спочатку передбачає сегментування мережі радіодоступу (RAN), що полегшує мультиплексування послуг, підвищення ефективності використання спектру, збільшення можливості підключення та зменшення затримки. Для пом'якшення впливу географічних "стілників", які

створюють для пристроїв небажаний ефект "переходу через границю", радіодоступ 5G розглядає окремо специфічні для користувача обладнання фізичні сигнали та ідентифікатори (ID) "стілники", надаючи мережам більше можливостей для вибору оптимального "променю" або «променів» для обслуговування користувачів, реалізуючи так звану архітектуру без стільників, орієнтовану на користувача (UCNC), щоб поліпшити взаємодію з користувачем на межі стільника за допомогою схем спільної передачі [2].

На додаток до існуючих сценаріїв використання 5G, які матимуть подальший розвиток від технології 6G очікується настання нової ери, в якій до однієї мережі будуть підключені люди, речі та інтелект з новими функціями, такими як виявлення та мережевий штучний інтелект (ШІ) [3]. У цьому контексті радіоінтерфейс 6G повинен відповідати як принципово новим ключовим показникам ефективності (KPI), так і набагато вищим або суворішим версіям колишніх KPI, порівняно з 5G [4]. Для забезпечення надзвичайно високої швидкості передачі даних та сканування з високою роздільною здатністю мережам 6G необхідно підтримувати ще більший діапазон спектру та ширшу смугу пропускання. Для досягнення цих нових складних цілей нам не обійтися без значних змін пристрою радіоінтерфейсу 6G. При цьому, необхідно повністю переосмислити ідеологію радіоінтерфейсу, починаючи з перших кроків розробки 6G. Для цього запропоновано кілька революційних змін парадигми.

Аналіз досліджень та публікацій

Для забезпечення високонадійного бездротового зв'язку потрібна точна інформація про канал. В даний час вибір каналу ґрунтується на результатах зондування (вимірювання) каналу за допомогою опорного сигналу (RS). На практиці через затримку вимірювання та надання результату, а також бажання уникнути непродуктивних витрат при вимірюванні каналу складно отримувати інформацію про канал у реальному часі. Також варто відзначити, що так зване «старіння каналу» погіршує продуктивність, особливо при роботі з високошвидкісним абонентським обладнанням [5].

Розвиток технології тестування каналів за допомогою ШІ на основі даних сканування та позиціонування може призвести до переходу від вибору каналів на основі RS до вибору з урахуванням поточного стану навколишнього середовища в реальному часі. Маючи інформацію, отриману в результаті сканування/локалізації, ми можемо значно спростити процес пошуку променю. Попереднє відстеження та прогнозування каналу можуть надати інформацію про канал у реальному часі та вирішити проблему старіння каналу. Крім того, нова технологія вибору каналів зводить до мінімуму накладні витрати при виборі каналу та енергоспоживання для мережевих та кінцевих пристроїв.

Технологія 5G підтримує агрегацію несучих частот суб-6G та міліметрового діапазону, а також допускає перехресну роботу несучих TDD та FDD. Важливими аспектами проектування мереж 6G є інтелектуальне використання спектру та керування каналними ресурсами. Для підтримки безпрецедентних швидкостей передачі даних, необхідних для 6G, буде досліджено більш високочастотні спектри з ширшою смугою пропускання (наприклад, верхня межа діапазонів частот від міліметрового до ТГц-діапазону). Однак на вищих частотах зумовлені серйозні втрати на трасі через атмосферне поглинання. Тому, при розробці радіоінтерфейсу 6G необхідно передбачити ефективне використання нових спектрів спільно з іншими низькочастотними діапазонами. Більше того, в епоху технології 6G буде доцільний більш просунутий повнодуплексний режим, хоча він уже застосовується в 5G. Тому варто розглянути можливість розробки спрощеного механізму, який забезпечує швидке перемикання між несучими та гнучке двонаправлене призначення ресурсів спектру мережі 6G. Також очікується, що визначення уніфікованої структури кадру та сигналів для FDD, TDD і повнодуплексного режиму спростять системні операції та підтримають співіснування обладнання користувача з різними можливостями дуплексного зв'язку [6].

Процеси та алгоритми обробки сигналів основної смуги частот зазвичай розробляються без ретельного обліку характеристик аналогових і радіочастотних компонентів через складність моделювання спотворень, що вносяться ними, і нелінійності. Це характерно для низьких частот, особливо з ефектами лінеаризації, такими як попереднє цифрове спотворення характеристик підсилювача потужності. В епоху розвитку систем 6G очікується, що їх конструкція фізично враховуватиме залежні від частоти погіршення або обмеження каналу, особливо в терагерцовій частині спектру [7]. Також можливе спільне проектування та оптимізація використання різних смуг частот завдяки вбудованим функціям штучного інтелекту [8].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є підвищення ефективності бездротового зв'язку шляхом оптимізації параметрів передачі для різних діапазонів спектра та різних послуг за рахунок використання інтелектуальних складових радіоінтерфейсу та технологій штучного інтелекту і машинного навчання.

Виклад основного матеріалу

Розробники нового радіо (NR) досягли значного прогресу в розробці нових технологій радіодоступу, затребуваних у різних сценаріях використання. Радіоінтерфейси NR показали значне поліпшення з точки зору продуктивності, гнучкості, масштабованості та ефективності в порівнянні з мережею 4G (LTE), яка поступово еволюціонує.

Нова система програмного радіоінтерфейсу забезпечує єдину структуру для підтримки частотних діапазонів нижче 6 ГГц і вище 6 ГГц, таких як міліметрові хвилі як для ліцензованого, так і для

неліцензійного доступу. Уніфікований радіоінтерфейс також підтримує як канал Uu між RAN і користувачами, так і прямі канали між пристроями. Гнучка масштабована нумерологія дозволяє оптимізувати параметри передачі для різних діапазонів спектра та різних послуг.

Уніфікований радіоінтерфейс NR також є конструктивно повним (самодостатнім) в частотній області. Самодостатність у частотній області дозволяє підтримувати гнучкіший поділ RAN за рахунок спільного використання ресурсів каналу між різними службами як за частотою, так і за часом. Принцип самодостатності сигналів у цій галузі також забезпечує повну сумісність із майбутніми випусками NR. Більше того, повнота у часовій області забезпечує швидкий зворотний зв'язок для послуг із малою затримкою.

Виходячи з обговорень технологічних тенденцій і сценаріїв використання та ключових показників ефективності, можна припустити, що мережа 6G буде набагато складніша, ніж мережа 5G з точки зору функціональності [1]. Структура майбутнього радіоінтерфейсу може бути надзвичайно складною, оскільки нові застосування, вимоги та ключові показники ефективності супроводжуються спробами мінімізувати витрати [2]. Цим і обумовлена потреба у революційному радіоінтерфейсі 6G. Структура нового радіоінтерфейсу 6G має бути більш інтелектуальною та екологічною е порівнянні з NR. Вона має відповідати всім вимогам технології 6G найбільш продуктивним чином з точки зору ефективності розгортання, вартості, енергоспоживання та складності [3]. Для створення такої конструкції необхідно ретельно вивчити та оптимально використовувати всі відповідні компоненти технології радіоінтерфейсу, включаючи III, новий спектр, неназемний зв'язок та сканування [4].

В даний час існують гнучкі механізми для спільної роботи зі спектром NR, які дозволяють оператору ефективно задіяти кілька доступних ресурсів спектру. Для ефективного застосування ресурсів спектру, в NR використовуються агрегування несучих (CA) та подвійне підключення (DC), що дозволяє збільшити смугу пропускання абонентського обладнання [5].

У випадку CA одного користувача обладнанню призначаються кілька компонентних несучих (CC). У разі DC абонентське обладнання може одночасно передавати і приймати дані по множині CC з двох груп стільників через головну і вторинну базові станції [6].

У технології NR CA підтримується гнучке агрегування спектру, включаючи агрегування частот нижче 6 ГГц та вище 6 ГГц, а також агрегування FDD та TDD. У технології NR DC для забезпечення більш тісної взаємодії між головною та вторинною базовою станціями підтримується кілька мережевих архітектур, включаючи LTE-NR DC та NR-NR DC. У LTE-NR DC пристрій спочатку підключається до радіомережі та базової мережі LTE, а потім підключається до радіомережі NR за допомогою реконфігурації керування радіоресурсами (RRC) [7].

Енергоефективність – це ключовий показник ефективності бездротових мереж як для кінцевих пристроїв, так і для мережі. Гнучка та масштабована структура системи 5G NR дозволяє використовувати різні стандартизовані методи енергозбереження для адаптації до різних навантажень та типів трафіку в мережах. Зокрема, стандарт NR підтримує адаптивний опорний сигнал (уникаючи використання постійного опорного сигналу) і гнучке відключення ресурсів, а також забезпечує пряму сумісність для реалізації енергоефективної мережі, механізму переривного прийому (DRX) і неактивного стану RRC [8].

Пристрій радіоінтерфейсу 6G має забезпечити абсолютно нову основу для ефективної підтримки всіх відомих та майбутніх технологій радіодоступу в мобільній мережі. Наведемо основні характеристики такого радіоінтерфейсу:

- більш інтелектуальний та екологічний, з вбудованим III та можливістю енергозбереження;
- забезпечує більш гнучке використання спектру до ТГц;
- підтримує ефективну інтеграцію зв'язку та сканування;
- сприяє більш тісній інтеграції наземного та неназемного зв'язку;
- забезпечує більш простий протокол та механізм керування з низькими накладними витратами та складністю.

Інтелектуальний протокол та механізми передачі сигналу є невід'ємною частиною персоналізованого радіоінтерфейсу з підтримкою III, який спочатку має підтримувати інтелектуальний фізичний рівень та інтелектуальний доступ до середовища. У цьому і полягає відмінність гнучкого радіоінтерфейсу NR від інтелектуального радіоінтерфейсу 6G.

• Інтелектуальний фізичний рівень: технології III та машинного навчання здатні обробляти масивні вибірки даних, вирішувати проблеми нелінійного відображення і створювати механізми передачі, що саморозвиваються. На основі III передбачається розроблення універсального модулю оптимізації різних функцій фізичного рівня для підвищення його адаптивності та гнучкості. У цьому контексті нам необхідний інтелектуальний механізм реконфігурування фізичних модулів, орієнтований на підтримку сценаріїв швидкої обробки масивних даних, таких як сканування, локалізація та глибоке занурення у віртуальну реальність.

• Інтелектуальний контролер MAC: методи машинного навчання здатні надати прогнози та стратегію. Оскільки із зібраних бездротових даних можна багато чого навчитися. Виходячи з цього можна уявити ситуацію, в якій до складу системи включені інтелектуальні контролери MAC, завдяки чому спрощується оперативне налаштування алгоритмів і параметрів радіоінтерфейсу. Завдяки кумулятивному методу навчання цей інтелектуальний контролер автономно навчиться настільки, щоб запам'ятовувати

досвід та приймати правильні рішення [1]. Завдяки контролерам МАС, що розповсюджуються, узгодженим налаштуванням різних модулів приймача і взаємодії між багатьма мережевими об'єктами можна очікувати величезного приросту продуктивності.

- Інтелектуальний протокол та передача сигналів: для реалізації інтелектуального фізичного рівня та інтелектуального МАС, а також інтеграції цих рівнів необхідні новий протокол та механізми передачі сигналів. Очікується, що 6G запропонує відповідний механізм забезпечення ефективної роботи інтелектуального фізичного рівня і МАС.

Досягнення в галузі штучного інтелекту та машинного навчання спонукали дослідників у галузі бездротового зв'язку використати відповідні методи для розробки модулів фізичного рівня для систем бездротового зв'язку наступного покоління [2]. Деякі засновані на машинному навчанні проекти передбачають адаптацію до нелінійних факторів у модулях фізичного рівня; це має місце, наприклад, при каналному кодуванні, модуляції та проектуванні форми сигналу, які традиційно засновані на математичних моделях. Більш того, очікується, що численні дані про канали та навколишнє середовище, зібрані за допомогою сканування в епоху 6G, можуть бути використані для полегшення проектування фізичного рівня за допомогою машинного навчання, наприклад, дані про стан каналу в системі МІМО [3]. Покажемо, в чому може полягати виграш від застосування машинного навчання та ШІ для основних модулів фізичного рівня:

- кодування та декодування каналу: кодування каналу необхідне для надійної передачі даних по зашумленим каналам. Хороший код каналу може приблизно дорівнювати межі Шенона. Хоча теорія інформації Шенона забезпечує мету чи критерій оцінки коду каналу, але вона не дає прямих вказівок для його розроблення. Реалізація каналного кодування в рамках теорії інформації в основному заснована на припущенні про канал з адитивним гаусовим білим шумом. Однак на практиці більшість каналів є каналами із замиранням. У цьому випадку для розробки кодування каналів відсутні навіть теоретичні критерії, і тут нам може допомогти машинне навчання. Декодування також викликає труднощі, оскільки зазвичай пов'язано з високою обчислювальною складністю. Іноді доводиться робити припущення для спрощення, щоб декодувати коди з доступною складністю, але за це доводиться платити зниженням продуктивності. Отже, моделі, що навчаються, також задіяні в каналних декодерах, де процес декодування може бути змодельований як завдання класифікації;

- модуляція і демодуляція: основне завдання модуля модуляції – відображення декількох бітів у символ, що передається, з урахуванням досягнення високої спектральної ефективності при обмеженій смузі пропускання. У системах бездротового зв'язку широко використовують класичні схеми модуляції, такі як M-QAM [4]. Подібні методи квадратурної модуляції гарантують низьку складність демодуляції приймача. Було виявлено, що існують інші сукупності схем модуляції, що використовують додаткові характеристики сигналу, такі як неевклідова відстань і імовірнісні розподіли. Отже, методи машинного навчання можна застосувати для формування та розробки відповідних комбінацій для конкретних сценаріїв застосування;

- МІМО та приймач: МІМО – дуже приваблива технологія, яка підвищує надійність та пропускну здатність бездротового зв'язку. Зі зростанням кількості антенних елементів системи МІМО збільшуються як переваги, так і складність проектування та керування. Тому доцільно використовувати методи машинного навчання для правильного проектування модулів, пов'язаних з МІМО, наприклад, для таких завдань, як зворотний зв'язок на основі CSI, вибір антени, попереднє кодування, а також оцінка та виявлення каналу [5]. Більшість алгоритмів машинного навчання може бути розгорнуто для автономного навчання / онлайнного висновку, що може вирішити проблему великих накладних витрат за навчання;

- форма хвилі та множинний доступ: генерація хвилі заданої форми відповідає за перетворення інформаційних символів у сигнали, що використовуються для поширення у вигляді електромагнітних хвиль. Звичайний модуль для створення сигналів можна замінити модулем глибокого навчання. Наприклад, методи з урахуванням глибокого навчання дозволяють проектувати сигнали складної форми без використання модуля DFT.

Від системи зі штучним інтелектом ми можемо очікувати на революційні інновації. Серед можливих напрямів майбутніх досліджень можна виділити такі:

- оптимізація та оновлення параметрів елементів фізичного рівня: оптимізовані параметри кожного модуля, такі як кодування, модуляція, параметри МІМО, дуже впливають на продуктивність систем зв'язку. Оптимізовані параметри можуть динамічно змінюватися через характеристики, що швидко змінюються в часі каналу фізичного рівня в реальному середовищі. Застосування нейромереж та методів машинного навчання значно полегшує отримання оптимізованих параметрів порівняно з традиційними схемами [6]. Крім того, традиційна оптимізація параметрів виконується для кожного складового блоку окремо, наприклад, у моделі кодової модуляції з перемежуванням бітів [3], у той час як узгоджена оптимізація кількох блоків може забезпечити додатковий приріст показників. До того ж, щоб адаптуватися до стану каналу, що швидко змінюється в часі, можна використовувати самонавчання оптимізованих параметрів за допомогою ШІ для подальшого підвищення показників;

- вибір каналу: отримання інформації про бездротовий канал та середовище передачі завжди було фундаментальним аспектом проектування системи бездротового зв'язку. Накопичені дані каналу та дані сканування зберігаються у вигляді наборів даних, на основі яких за допомогою нейромережі можна побудувати радіокарту середовища. Маючи радіокарту, інформацію про канал можна отримати не тільки шляхом звичайних вимірювань, а й шляхом зіставлення її з іншою інформацією, такою як розташування;

- формування та супровід променю: оскільки несуча частота досягає міліметрового або навіть ТГц-діапазону, в бездротовому зв'язку широко застосовуються такі операції, як формування, наведення та супровід променю. У цьому контексті важливо мати ефективні алгоритми формування та супроводу променю. Методи машинного навчання можуть застосовуватися для комплексної оптимізації вибору антени, динамічного формування діаграми спрямованості та попереднього кодування [7];

- сканування та позиціонування: дані високої якості мають основне значення для технологій машинного навчання та III. В системах 6G завдяки великій пропускну здатності, новому спектру, щільній мережі та більшій кількості каналів LOS можуть бути отримані і виміряні параметри каналу та дані сканування/позиціонування. На основі цих даних за допомогою навченої нейромережі можна скласти радіокарту навколишнього середовища, де інформація про канал пов'язана з відповідним місцезнаходженням або інформацією про навколишнє середовище; отже, можна поліпшити структуру фізичного рівня [8].

Контролер на рівні MAC відіграє важливу роль для забезпечення безперебійної роботи мережі радіодоступу. Він приймає безліч ключових рішень протягом життєвого циклу системи зв'язку, таких як формування променю, керування променем, використання спектру, виділення ресурсів каналу, адаптація MCS, керування автоматичним гібридним повторним запитом, адаптація режиму Tx/Rx, керування потужністю і зниження взаємних завад. Середовище бездротового зв'язку дуже динамічне через мінливі умови каналу, трафіку, навантаження, завад [4].

У загальному випадку продуктивність системи покращується, якщо параметри передачі можуть адаптуватися до середовища, що швидко змінюється. Проте традиційні методи вирішення вищезгаданих проблем на основі класичної теорії оптимізації зазвичай є NP-важким завданням і надто складними для реалізації. У цьому випадку машинне навчання може стати потужним інструментом для створення інтелектуального контролера для оптимізації бездротової передачі на рівні MAC.

При переході до інтелектуальної системи контролера MAC, що спочатку використовує машинне навчання, необхідно делікатно вирішити дві проблеми: • **одиначний агент або мультиагент:** на відміну від моделей DRL, що використовуються в інших областях, де одного агента може бути достатньо для більшості додатків, для систем бездротового зв'язку потрібна багатоагентна система DRL [5]. Незважаючи на те, що кожен контролер базової станції може приймати індивідуальні рішення, система завжди краще працює у випадку спільно прийнятих рішень кількох базових станцій. На щастя, багато алгоритмів DRL мають багатоагентні аналоги. Однак процедура навчання багатоагентної моделі DRL набагато складніша, ніж одноагентна. Вибір між одним та декількома агентами – це, по суті, компроміс між якістю та складністю навчання; **спільна чи індивідуальна оптимізація:** будучи обмеженими обчислювальною потужністю, традиційні алгоритми зазвичай застосовують у невеликому обсязі щодо всієї системи. Наприклад, багато рішень у стільникових мережах приймаються всередині стільника, що призводить лише до локальних оптимумів [6]. За допомогою кількох агентів спільна оптимізація може бути досягнута у більшому обсязі. Взаємодія між агентами є ефективним способом побудови інтелектуального контролера MAC.

Отже, для підтримки спеціалізованих структур радіоінтерфейсу і, таким чином, для підтримки різних послуг і пристроїв у мережі бажано мати інтелектуальний фізичний рівень і контролер MAC. Але для підтримки цих опцій на фундаментальному рівні мережі 6G потрібні новий протокол та механізм передачі сигналу. Це дозволить персоналізувати відповідний радіоінтерфейс з параметрами для задоволення конкретних вимог, при цьому мінімізуючи накладні витрати на роботу з сигналом і максимізуючи ефективність використання спектру всієї системи за допомогою персоналізованих технологій штучного інтелекту. Наведемо деякі приклади інтелектуального протоколу та механізму передачі сигналу:

- **надгнучка структура кадру і гнучка передача сигналів:** наприклад, надгнучка структура кадру в персоналізованій структурі радіоінтерфейсу може бути спроектована з більш гнучкими параметрами форми сигналу і тривалості передачі. Ці параметри можуть бути пристосовані для різних вимог широкого діапазону сценаріїв, наприклад для надзвичайно низької затримки 0,1 мс. В результаті для кожного параметра в системі є безліч варіантів. Структура керуючих сигналів повинна бути гранично простою і гнучкою, що вимагає лише декількох форматів керуючих сигналів, тоді як інформація, що керує, може мати змінний розмір. Вона також може мати пряму сумісність без необхідності вводити новий формат для майбутніх розробок 6G;

- **інтелектуальне використання спектру:** оскільки потенційний спектр для 6G може складатися зі смуг низько- та середньочастотного діапазону, міліметрових хвиль, ТГц-діапазону та навіть видимого світла. Таким чином, сукупна ширина спектру 6G набагато ширша, ніж у 5G, і розробка високоефективної системи підтримки такого широкого спектрального діапазону є складним завданням [7].

У мережах 4G і 5G для спільного використання кількох частин широкого спектра застосовуються обидві схеми: CA (агрегація несучих частот), і DC (подвійне підключення). В мережах 5G для забезпечення гнучкого використання спектру застосовується кілька схем DC. У зв'язку з великою кількістю комбінацій несучих частот для мережі 6G потрібен новий простий та ефективний інтелектуальний радіоінтерфейс, здатний підтримувати весь спектральний діапазон.

Поточний розподіл спектру та структура кадру зазвичай пов'язані з дуплексним режимом, FDD або TDD, що може накладати обмеження на ефективне використання спектру. Очікується, що повний дуплекс досягне зрілості в епоху 6G і що бездротові мережі, що створюються, будуть містити все більше і більше

вузлів (кінцевих користувачів і точок доступу) з різними смугами частот.

Прикладами структури зв'язку, яка не обмежується напрямками висхідної та низхідної ліній, є зв'язок D2D, зв'язок IAB, неназемний зв'язок [8]. У цьому випадку для підтримки всіх дуплексних режимів та вузлів можна спроектувати однокадрову структуру, а схеми розподілу ресурсів в інтелектуальному радіоінтерфейсі зможуть виконувати ефективні передачі по множинних радіоканалах; вбудоване інтелектуальне енергозбереження: при проектуванні екологічно безпечної мережі на базі 6G енергозбереження є очевидною та важливою вимогою. Для мінімізації енергоспоживання як кінцевих пристроїв, так і мережеских вузлів при розробці нової системи необхідно спершу враховувати енергозбереження.

Радіоінтерфейс 6G передбачає інтелектуальне керування MIMO та променем, інтелектуальне використання спектру та точне позиціонування [4]. Це може значно знизити енергоспоживання як пристроїв, так і мережеских вузлів у порівнянні з традиційними технологіями, особливо під час передачі масивних даних. Таким чином, радіоінтерфейс 6G є основою енергозбереження системи.

Очікується, що за допомогою інтелектуальних технологій у мережі 6G може бути значно скорочено тривалість передачі даних. В результаті кінцевий пристрій може довше залишатися в режимі сну, коли він не має активного доступу до мережі або не взаємодіє з нею. Це один із аспектів вбудованого енергозбереження, що особливо важливо для енергоефективних пристроїв та екологічно безпечних мереж [5].

Для досягнення максимальної економії енергії кінцевими пристроями і мережескими вузлами ефективні канали передачі можуть бути спроектовані з урахуванням мінімізації сигналів керування та кількості переходів між станами або змін режиму потужності. У той же час, оскільки мережа 6G повинна підтримувати сценарії використання із надмалою затримкою, такі як покращений URLLC (або URLLC+), очікується, що ці схеми власного енергозбереження забезпечуватимуть гнучкі функціональні можливості. Вони не заважатимуть надшвидкому доступу до мереж та надвисокій передачі даних; прикладом є інтелектуальне керування режимами харчування та роботою.

Оскільки радіоінтерфейс буде персоналізовано для кожного пристрою, різні типи пристроїв матимуть різні вимоги до споживання енергії. При цьому, можна буде легко персоналізувати рішення щодо енергозбереження для різних типів пристроїв дотримуючись вимог до якості зв'язку.

Більшість недавніх спроб впровадження машинного навчання в радіомережі зводилися до заміни одного або кількох традиційних компонентів фізичного рівня їхньою вдосконаленою версією. Передбачається, що в епоху технології 6G базова мережева структура буде нерозривно пов'язана із технологією штучного інтелекту. Це відрізнятиме її як від 5G, так і від попередніх систем бездротового зв'язку, в яких методи машинного навчання спочатку навіть не розглядаються. У системі 6G технології радіозв'язку та штучного інтелекту з першого кроку розвиватимуться разом у напрямку реалізації надзвичайно ефективної обробки інформації, сканування середовища передачі та інтелектуальних можливостей радіоінтерфейсу.

На рис. 1 показано застосування машинного навчання, тобто пристрій каналу E2E. У цьому випадку ланцюг передачі та модулі можуть бути реорганізовані. Деякі раніше описані функції можуть бути відсутніми. Під час передачі та прийому інформації передавач інтелектуально узгоджуватиме зміни джерела інформації в реальному часі через нейронні мережі. Приймач також витягуватиме корисну інформацію з отриманих даних відповідно до конкретних завдань. Це вже не універсальний підхід до обробки даних, що ґрунтується на унікальному критерії (доставка та відновлення повідомлень без помилок), як описано в роботі Шенона [4].

Є багато теорій, що використовуються для розуміння штучного інтелекту. Серед них теорія інформаційних вузьких місць [5] є найбільш придатною для завдань комунікації фізично, оскільки вона використовує ідею взаємної інформації з теорії інформації як показник оптимізації. Заснована на теорії інформаційних вузьких місць, архітектура автоенкодера (AE) є одним із ключових інструментів для проектування наскрізних каналів зв'язку на основі ШІ. Більш детальну інформацію про теорію інформаційних вузьких місць та архітектури автоенкодерів також можна знайти в [6].

Інтелектуальний канал зв'язку може відкрити нові можливості та потенційно стати базовою структурою зв'язку у майбутньому. Проте методи машинного навчання потребують більших обсягів даних. Щоб задіяти ШІ в бездротовому зв'язку, необхідно буде збирати, зберігати і передавати обсяги даних, що постійно зростають.

На відміну від даних з простими характеристиками, наприклад в області комп'ютерного зору або обробки природної мови, характеристики бездротових даних охоплюють великі діапазони в декількох областях, наприклад, від міліметрових до терагерцових частот, поширення в космосі, у відкритому наземному просторі, в приміщеннях, передачу тексту, голосу та відео. Ці дані настільки відрізняються один від одного, що буде важко поєднати їх збір, обробку та використання в рамках єдиної системи.

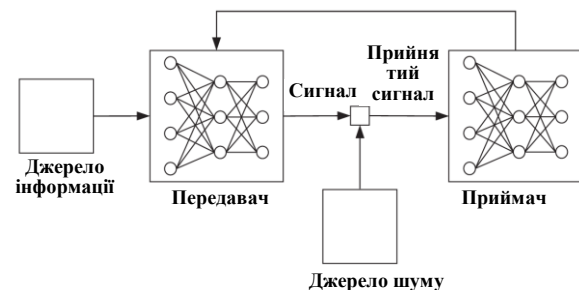


Рис. 1. Інтелектуальний наскрізний канал зв'язку (E2E)

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Досліджено конструкцію радіоінтерфейсу 6G, яка заснована на поєднанні штучного інтелекту, керованого моделями та даними, і, як очікується, має забезпечити індивідуальну оптимізацію радіоінтерфейсу від попередньої конфігурації до самонавчання. Визначено особливості налаштування схеми мережі та параметрів передачі на рівні абонентського обладнання та служб за допомогою персоналізованого радіоінтерфейсу для максимізації індивідуального досвіду користувача без шкоди для пропускної спроможності системи в цілому.

Розглянуто штучний інтелект, який буде вбудованою функцією радіоінтерфейсу, що створює інтелектуальний фізичний рівень і відповідає за керування доступом до середовища передачі даних (MAC), оптимізацію мережевого керування (наприклад, балансування навантаження та енергозбереження), заміною деяких нелінійних або невикликаних алгоритмів у модулях приймачів або компенсацію недоліків у нелінійних моделях.

Досліджено вбудований інтелект, який зробить фізичний рівень 6G більш просунутим та ефективним, полегшить оптимізацію структурних елементів фізичного рівня та процедурне проектування, включаючи можливу зміну архітектури приймача, допоможе реалізувати нові можливості виявлення та позиціонування, що, своєю чергою, значно вплине на конструкцію компонентів радіоінтерфейсу.

Визначено вимоги до мережі 6G, які передбачають створення єдиної мережі з функціями сканування та зв'язку, які повинні бути інтегровані в єдину структуру на етапі проектування радіоінтерфейсу. Досліджено особливості ретельного проектування мережі зв'язку та сканування, яка буде пропонувати повні можливості сканування, а також повніше відповідати всім ключовим показникам ефективності в галузі зв'язку.

Література

1. Sohrabi F., Cheng H. V. Robust symbol-level precoding via autoencoder-based deep learning, in Proc. 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2020, pp. 8951–8955.
2. Balevi E., Doshi A., Andrews J.G. Massive MIMO channel estimation with an untrained deep neural network, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 3, pp. 2079–2090, 2020.
3. Wang B., Si Q., Jin M. A novel tone reservation scheme based on deep learning for PAPR reduction in OFDM systems, IEEE Communications Letters, vol. 24, no. 6, June 2020.
4. Xu C., Wang J., Yu T., Kong C., Huangfu Y., Li R., Ge Y., Wang J. Buffer-aware wireless scheduling based on deep reinforcement learning, in Proc. 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2020, pp. 1–6.
5. Meng F., Chen P., Wu L., Cheng J. Power allocation in multiuser cellular networks: Deep reinforcement learning approaches, IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020.
6. Васильківський М. В. Оцінювання енергетичних характеристик радіоканалів міліметрового діапазону / М. В. Васильківський, О. І. Мельничук, О. В. Стальченко // Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПІРН-2019)", Вінниця, 14-16 листопада 2019 р. – 2019. – С. 80–81.
7. Васильківський М. В. Оптимізація параметрів інфокомунікаційних мереж п'ятого покоління / М. В. Васильківський, С. О. Болдинюк // Матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СПІРН-2019)", Вінниця, 14-16 листопада 2019 р. – 2019. – С. 68–69.
8. Кичак В. М. Технології надпровідних приймачів терагерцового діапазону / В. М. Кичак, М. В. Васильківський // Матеріали тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції "Перспективи телекомунікацій", 15–19 квітня 2019 р. – Київ : Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського". – С. 222–224.

References

1. Sohrabi F., Cheng H. V. Robust symbol-level precoding via autoencoder-based deep learning, in Proc. 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2020, pp. 8951–8955.
2. Balevi E., Doshi A., Andrews J.G. Massive MIMO channel estimation with an untrained deep neural network, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 19, no. 3, pp. 2079–2090, 2020.
3. Wang B., Si Q., Jin M. A novel tone reservation scheme based on deep learning for PAPR reduction in OFDM systems, IEEE Communications Letters, vol. 24, no. 6, June 2020.
4. Xu C., Wang J., Yu T., Kong C., Huangfu Y., Li R., Ge Y., Wang J. Buffer-aware wireless scheduling based on deep reinforcement learning, in Proc. 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2020, pp. 1–6.
5. Meng F., Chen P., Wu L., Cheng J. Power allocation in multiuser cellular networks: Deep reinforcement learning approaches, IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020.
6. Vasylykivskiy M. V. Otsiniuvannia enerhetychnykh kharakterystyk radiokanaliv milimetrovoho diapazonu / M. V. Vasylykivskiy, O. I. Melnychuk, O. V. Stalchenko // Materialy I Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Suchasni problemy infokomunikatsii, radioelektroniky ta nanosystem (SPIRN-2019)", Vinnytsia, 14-16 lystopada 2019 r. – 2019. – S. 80–81.
7. Vasylykivskiy M. V. Optymizatsiia parametriv infokomunikatsiinykh merezh piatoho pokolinnia / M. V. Vasylykivskiy, S. O. Boldyniuk // Materialy I Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Suchasni problemy infokomunikatsii, radioelektroniky ta nanosystem (SPIRN-2019)", Vinnytsia, 14-16 lystopada 2019 r. – 2019. – S. 68–69.
8. Kychak V. M. Tekhnologii nadprovodnykh prymachiv terahertsovoho diapazonu / V. M. Kychak, M. V. Vasylykivskiy // Materialy trynadtsiatoi mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Perspektyvy telekomunikatsii", 15–19 kvitnia 2019 r. – Kyiv : Natsionalnyi tekhnichniy universytet Ukrainy "Kyivskiy politekhnichniy instytut imeni Ihoria Sikorskoho". – S. 222–224.