

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-15>

УДК 621.391

ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ Микола

Вінницький національний технічний університет

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

e-mail: [mvasylkivskyi@gmail.com](mailto:mvasylkivskyi@gmail.com)

НІКІТОВИЧ Діана

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8907-1221>

e-mail: [diananikitovych@gmail.com](mailto:diananikitovych@gmail.com)

ГРАБЧАК Назарій

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [nazarii.hrabchak@gmail.com](mailto:nazarii.hrabchak@gmail.com)

ЯКУБІВСЬКА Наталія

Вінницький національний технічний університет

e-mail: [nakubivska@gmail.com](mailto:nakubivska@gmail.com)

## ОПТИМІЗАЦІЯ АДАПТИВНИХ РАДІОСИСТЕМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМІВ ШІ ТА МН

*Досліджено мережі 6G із більш гнучким розподіленням спектру за рахунок використання не тільки спектру, але й часу та інших мережевих ресурсів. Це може бути досягнуто за допомогою нових технологій, таких як програмована метаповерхня і мережеве управління ресурсами (NRM). Розглянуто особливості забезпечення більш гнучкого розподілу спектру у 6G за рахунок використання методів неортогонального частотного розміщення (NFT), які дозволяють кільком користувачам використовувати один і той же канал без взаємних перешкод. Визначено можливість використання інших технологій, таких як когнітивне радіо, що дозволяє мережі динамічно реагувати на зміни у середовищі і адаптуватися до потреб користувачів.*

*Розглянуто особливості розподілу мережі на сегменти, який став важливим елементом системи 5G для підтримки різних викликів мережевого трафіку та забезпечення різних рівнів сервісу для різних користувачів. Проте, системи 6G зосередяться на ще більш гнучкому та ефективному розподілі мережі на сегменти, з використанням технологій віртуалізації та контейнерів. Досліджено ефективне використання ресурсів мережі, більш точне розподілення трафіку та забезпечення кращого рівня сервісу для кожного користувача, незалежно від його місцезнаходження із застосуванням технології віртуалізації, яка дозволить забезпечити більш простий та швидкий доступ до мережевих ресурсів та забезпечить швидку та ефективну реакцію на змінні вимоги користувачів.*

*Визначено, що інтегрування між наземними та стільниковими мережами дійсно може підвищити цінність мереж 6G за рахунок створення більш гнучкої та ефективної мережевої інфраструктури, що зможе забезпечувати широкий спектр послуг і додаткові можливості для мобільних користувачів. Наземні мережі зазвичай використовуються для передачі великих обсягів даних та надання послуг з низькою затримкою. Стільникові мережі, з іншого боку, забезпечують мобільність та широкий охоплюють районів. Інтеграція цих мереж може дозволити використовувати переваги обох мереж, забезпечуючи високу пропускну здатність та низьку затримку, а також мобільність та широке охоплення зони покриття. Обґрунтовано, що інтеграція мереж може забезпечити більш ефективне використання ресурсів мережі, зокрема краще використання різних радіочастотних діапазонів та зниження витрат на інфраструктуру, підтримку мережі та обслуговування користувачів.*

*Ключові слова: гнучкий розподіл спектру, технологія когнітивного радіо, ефективна мережева інфраструктура, стільникова мережа, радіочастотний діапазон, алгоритм машинного навчання, алгоритм штучного інтелекту.*

VASYLKYVSKYI Mikola, NIKITOVYCH Diana,

HRABCHAK Nazarii, YAKUBIVSKA Nataliya

Vinnitsia National Technical University

## OPTIMIZATION OF ADAPTIVE RADIO SYSTEMS USING AI AND ML ALGORITHMS

*We investigate 6G networks with more flexible spectrum allocation by using not only spectrum, but also time and other network resources. This can be achieved with the help of new technologies, such as programmable metasurface and network resource management (NRM). The features of providing more flexible spectrum allocation in 6G through the use of non-orthogonal frequency allocation (NFT) methods, which allow multiple users to use the same channel without mutual interference, are considered. The possibility of using other technologies, such as cognitive radio, which allows the network to dynamically respond to changes in the environment and adapt to the needs of users, is determined.*

*The features of network segmentation are considered, which has become an important element of the 5G system to support different network traffic challenges and provide different levels of service for different users. However, 6G systems will focus on even more flexible and efficient network segmentation using virtualization and container technologies. The article investigates the efficient use of network resources, more accurate traffic distribution and providing a better level of service for each user, regardless of their location, using virtualization technology, which will provide easier and faster access to network resources and ensure a quick and efficient response to changing user requirements.*

*It is determined that integration between terrestrial and cellular networks can indeed increase the value of 6G networks by creating a more flexible and efficient network infrastructure that can provide a wide range of services and additional features for*

mobile users. Terrestrial networks are typically used to transfer large amounts of data and provide low-latency services. Cellular networks, on the other hand, provide mobility and wide area coverage. Integration of these networks can take advantage of the benefits of both networks, providing high bandwidth and low latency, as well as mobility and wide area coverage. It is substantiated that the integration of networks can provide more efficient use of network resources, in particular, better use of different radio frequency bands and reduced costs for infrastructure, network support and user service.

Keywords: flexible spectrum allocation, cognitive radio technology, efficient network infrastructure, cellular network, radio frequency range, machine learning algorithm, artificial intelligence algorithm.

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

Телекомунікаційні системи мобільного зв'язку отримали поступовий розвиток із врахуванням одночасної експлуатації різного рівня мережевого обладнання. Так само телекомунікаційне обладнання на базі технології 4G постійно модифікується, отримуючи нові функції та розвивається до рівня телекомунікаційних систем на базі технології 5G. Поступове розгортання систем 5G вказує на тривалий перехід на телекомунікаційну технологію 5G у порівнянні із періодом впровадження технології 4G, оскільки при цьому має бути впроваджено багато нових функцій. В результаті, одночасно із оптимізацією вже впроваджених систем 5G, провідні фахівці стільникового зв'язку та мереж почали досліджувати телекомунікаційні системи на базі технології 6G, яка революціонізує бездротовий зв'язок і мережі з більшими вимогами, ніж системи 5G [1]. Використання кардинального підходу до реалізації систем 6G дозволить переосмислити комунікації та мережі залежно від необхідних інформаційних послуг. Штучний інтелект (AI) та машинне навчання (ML) є одними з ключових технологій для телекомунікаційних систем 6G. AI та ML є зрілими технологіями та значно вдосконалюють багато різних галузей досліджень, пронизують усі аспекти життєдіяльності людства. Таким чином, очікується значне підвищення ефективності існуючих робочих місць, а також створення нових програм та послуг. AI відіграватиме вирішальну роль у бездротовому зв'язку та мережах і змінить методику проектування та керування зв'язком і мережами 6G. При цьому, що штучний інтелект зробить комунікації та мережеве проектування й керування розумнішим і безпечнішим. Тому ключовим питанням є особливості впровадження штучного інтелекту у системах зв'язку 6G [2].

Прогалини поточної системи стільникового зв'язку визначають напрямок вдосконалення апаратно-програмного забезпечення в майбутній системі. Наприклад, конфіденційність і безпека є одним із недоліків стільникової системи для розширення приватних інформаційних послуг. Тому, вони будуть основною частиною розвитку телекомунікаційних технологій. У телекомунікаційних системах 3G однією з ключових функцій була послуга високої швидкості передачі даних, а цільовою основною програмою був веб-перегляд, який не був досить успішним. За допомогою економічно ефективних рішень в телекомунікаційних системах 4G забезпечено високу швидкість передачі даних, включаючи передачу відео та перегляд веб-сторінок. Усі функції систем 6G не будуть задоволені одночасно. Для виконання всіх функціональних вимог знадобиться деякий час, оскільки розвиток, удосконалення та впровадження одного покоління стільникових мереж триває 10 років. Системи 6G будуть поступово розвиватися та розгортатися разом із новим функціоналом телекомунікаційного обладнання. Крім того, існує великий розрив між теоретичною роботою та практичним впровадженням. Хоча деякі технології теоретично забезпечують високу продуктивність і їх впровадження в лабораторних масштабах є успішним, а комерційне виробництво та розгортання можуть бути неможливими. На практиці вони не працюють так добре, як очікувалось, зокрема, є багато успішних демонстрацій технологій антенних решіток у лабораторному масштабі, але вони все ще не готові для розгортання в практичних стільникових системах [3].

### **Аналіз досліджень та публікацій**

Пропускна здатність є найважливішим параметром для застосунків: HSD, ABF і CSAI в яких буде оброблятися величезна кількість переданих даних. Безумовно, це ключовий показник систем 6G. Часові характеристики враховують параметри затримки, синхронізації, джитеру, точності планування і точності геолокації. Зокрема, затримка поширення сигналів відіграє ключову роль у високошвидкісних телекомунікаційних мережах 6G. Безпека мережі передбачає контроль інформаційної безпеки, конфіденційності, надійності та достовірності переданих інформаційних даних. Безпека пов'язана з більшістю варіантів використання сучасного телекомунікаційного обладнання. З точки зору конкретних сценаріїв використання телекомунікаційного обладнання повинні бути забезпечені різні рівні інформаційної безпеки. У системах 6G і наступних поколіннях важливість безпеки і захисту конфіденційності зростатиме. ШІ передбачає обчислення, зберігання, моделювання, збір і аналіз даних, а також можливість програмування. Варіант використання CSAI тісно пов'язаний з аспектом штучного інтелекту. ManyNet (MN) включає в себе адресацію, мобільність, мережевий інтерфейс і конвергенцію гетерогенних мереж. ManyNetwork - це гетерогенність фізичних і логічних моделей, яка передбачає безперешкодну роботу в Інтернеті гетерогенних мереж і пристроїв [3].

Інший погляд на архітектуру мереж 6G можна підсумувати так: вирішення соціальних проблем,

комунікація між людьми і речами, розширення комунікаційного середовища та вдосконалення кібер-фізичного злиття.

В мережах 6G багато інформаційних послуг, таких як дистанційна робота, телемедицина, дистанційне навчання та автономна робота будуть реалізовані за допомогою високошвидкісного зв'язку та мереж з низькою затримкою. При впровадженні засобів надання послуг Інтернету речей зростає попит на забезпечення зв'язку між ними. При цьому, в системах 6G будуть використовуватися пристрої Інтернету речей з більш високими вимогами, такими як обробка зображень у форматі 4K або 8K і контроль затримки поширення та оброблення даних. Крім того, комунікаційне середовище буде розширюватися в багатьох напрямках. Безумовно, висотні будівлі, дрони, літаки і літаючі таксі отримають якісні рішення для зв'язку за рахунок використання технології 6G. Нарешті, багато речей, таких як транспортні засоби, машини, камери і датчики, будуть з'єднані в кіберпросторі. У системах 6G буде впроваджено набагато більше послуг, що використовують кібер-фізичний синтез. Отже, системи 6G забезпечують передавання великого об'єму оброблених даних між кіберпростором та фізичним простором із дотриманням достатнього рівня інформаційної безпеки користувачів. Для підтримки чотирьох варіантів використання 6G необхідно задовольнити нові комбінації вимог. Наприклад, застосування масового машинного зв'язку (mMTC) вимагає низької швидкості передачі даних і масового підключення в системах 5G. Однак пристрої Інтернету речей стають розумнішими і потребують підвищеної обчислювальної потужності. Інформаційні послуги IoT 6G вимагають підвищеної швидкості передачі даних. Таким чином, висока швидкість передачі даних та масове підключення до телекомунікаційних послуг формують нову комбінацію вимог для мереж доступу 6G.

### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** покращення продуктивності, ефективності та надійності мобільних систем за допомогою методів оптимізації параметрів, керування ресурсами та інформаційним трафіком із використанням технологій штучного інтелекту та машинного навчання, що сприяють впровадженню інфокомунікаційних мереж 6G.

Задачами дослідження є особливості застосування алгоритмів ШІ до бездротових мереж зв'язку:

- дослідження особливості застосування алгоритмів штучного інтелекту в бездротових системах;
- основні програми та функції, які добре поєднуються з компонентами бездротових систем, що включають в себе: оптимізаційні алгоритми, алгоритми машинного навчання, алгоритми класифікації;
- покращення продуктивності бездротових систем за допомогою алгоритмів штучного інтелекту, зокрема: пропускну здатності, енергоефективності, надійності;
- оптимізації проектування бездротових систем із використанням ШІ, зокрема: алгоритми маршрутизації та графічного проектування, тестування та відлагодження, планування та керування;
- особливостей коригування параметрів систем 6G із використанням алгоритмів штучного інтелекту, зокрема підвищення продуктивності та зменшення затримок, підвищення надійності та безпеки, покращення енергоефективності та розширення можливостей застосування.

### Виклад основного матеріалу

Зростання мережевого трафіку в геометричній прогресії та значне збільшення кількості макро-, піко- і фемтосот зумовлює розгортання надщільних мереж (UDN) на основі 6G технології із використанням різних типів високощільнених стільників в міських районах. При цьому, технологія UDN стикається з новими викликами, такими як різні типи розгорнутих мереж та високі завади між стільниками, оскільки підвищена щільність стільникового зв'язку спричиняє зростання завад. У традиційних стільникових мережах мобільні пристрої (обладнання користувачів (UE) або мобільна станція (MS)) підключаються до однієї стільникової мережі серед декількох доступних. Точки доступу (AP) або базові станції (BS) мають кілька мобільних пристроїв, які впливають на сусідні точки доступу або мобільні пристрої. У системах 4G прийнята концепція спільної обробки сигналів і тому такі стільникові мережі мають кращу спектральну ефективність. Основна ідея полягає в тому, щоб виконувати обробку даних в декількох точках доступу і передавати їх на один мобільний пристрій через кілька точок доступу. На такій концепції спільної обробки базуються координоване багатоточкове передача/приймання (CoMP) в LTE, координована багатоточкова передача зі спільною передачею (CoMP-JT) [1] і багатостільникові кооперативні мережі MIMO [2]. Ці методи поділяють точки доступу на розрізнені кластери і реалізуються мережево-орієнтованим способом. Це дозволяє декільком точкам доступу в кластері спільно передавати один набір даних на один мобільний пристрій, що схоже на розподілену антенну систему. Однак ці методи не знайшли широкого застосування в системах LTE через розрив між теоретичним і практичним коефіцієнтом підсилення. Інший підхід, орієнтований на користувача, був впроваджений для спільної передачі з декількох точок доступу. При цьому, орієнтований на користувача спосіб враховує завади і передає сигнал конкретному користувачеві. В результаті, мобільний пристрій спільно обслуговується декількома точками доступу в кластері, що забезпечує зменшення рівня завад за рахунок усунення границь між стільниками [2]. Традиційна архітектура RAN (Radio Access Network) використовує централізовану модель, де всі функції базової станції (BS)

знаходяться в спеціалізованих апаратах на місцевості (on-premise). Це включає радіообладнання, базову станцію та контролер радіоакcesу (RAC). Традиційна архітектура RAN відома своєю ефективністю та надійністю, але вона може бути складною для розгортання та масштабування. 5G vRAN (Virtualized RAN) є еволюцією традиційної архітектури RAN, де функції базової станції віртуалізуються та можуть бути розгорнуті на загальнопризначених серверах (COTS - Commercial off-the-shelf). Використання віртуалізації дозволяє розміщувати різні функції RAN, такі як базові станції та контролери радіоакcesу, на віртуальних машинах або контейнерах. Це дозволяє більшу гнучкість та ефективне використання ресурсів. Open RAN є концепцією, яка пропонує розширити віртуалізацію та стандартизацію в RAN шляхом розробки відкритих стандартів та інтерфейсів. Він підтримує ідею розділення апаратних та програмних компонентів RAN, що дозволяє операторам вибирати рішення від різних постачальників. Це дає більшу гнучкість та відкриває двері для нових інновацій та конкуренції на ринку RAN. На рис. 1 показано порівняння традиційної архітектури RAN, 5G vRAN та Open RAN.

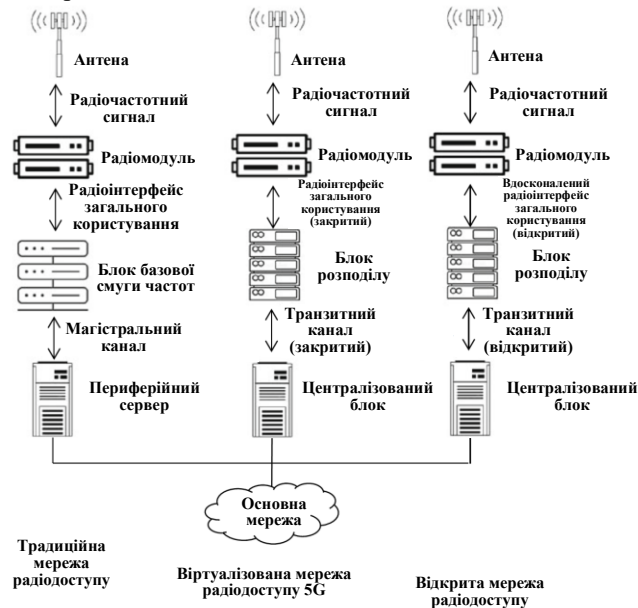


Рис. 1. Порівняння архітектури сегментів мобільних мереж RAN, 5G vRAN та Open RAN

Таким чином, вказана концепція використовується в кооперативній MIMO [3], кооперативних малих стільниках [4] та хмарній/централізованій мережі радіодоступу (C-RAN) [5]. Важливим аспектом при реалізації орієнтованої на користувача мережі з декількома точками доступу є синхронізація і опорні сигнали між точками доступу. При цьому, мобільний пристрій повинен знайти і вибрати найкращу стільникову мережу, отримавши синхронізацію часу і частоти, а також визначивши відповідний ідентифікатор стільника та опорні сигнали.

Канал зв'язку з використанням БПЛА, оснащеного МЕС, буде корисним для додатків з низькою затримкою. Прикладами використання зв'язку за допомогою БПЛА можуть бути прямі трансляції на 360 градусів, тимчасові ретрансляційні вузли в надзвичайних ситуаціях, приватні мережі стільникового зв'язку [6]. Основним завданням БПЛА при забезпеченні зв'язку є пошук оптимального позиціонування в сценарії розгортання телекомунікаційної мережі. Використання каналів передавання БПЛА використовувати для безпроводних ретрансляторів або транзитних радіоканалів стільникових мереж забезпечує багато переваг, таких як висока мобільність і швидке розгортання. При цьому, забезпечується можливість зменшення блокування і втрат в радіотракті, а також підвищення надійності і пропускної здатності каналів передавання. Інтегрована мережа між наземними і стільниковими мережами відображає переваги мереж 6G. На рис. 2 показано приклад інтегрованих мереж між наземними і стільниковими мережами [7].

Для покращення якості радіозв'язку та оптимізації пропускної здатності каналів у системах 6G повинні бути більш ефективними ключові компоненти фізичного рівня. В стільникових системах схеми каналного кодування еволюціонували від згорткового кодування до турбокодування і LDPC. При цьому, основною метою каналного кодування в каналі для одного користувача є досягнення межі Шенона. Зокрема, турбо-кодування та LDPC забезпечують близьку до межі Шенона продуктивність використання каналів передавання. Визначено, що використання множинних каналів покращує продуктивність мереж 5G та 6G, але зумовлює ускладнення схемотехніки приймача радіосистеми. Іншим завданням дослідження каналного кодування є особливості застосування недвійкових кодів.

Отже, використання недвійкових LDPC із турбо-кодуванням забезпечують кращу продуктивність радіосистем, але при цьому, збільшується складність у порівнянні із двійковими LDPC і турбо-кодуванням.

Ще одним завданням дослідження у галузі кодування каналів є створення надійної схеми кодування каналів з коротким кодовим словом. В результаті, підвищення продуктивності радіосистем при застосуванні турбо-кодів та кодів LDPC передбачає використання пакетів великої довжини. Ускладнене використання турбо-кодів або кодів LDPC для додатків URLLC зумовлене використанням інформаційних пакетів даних із невеликим розміром для забезпечення мінімальної затримки поширення сигналів в радіотракті. В результаті, виникає необхідність створення нової схеми кодування, яка дозволить досягти близької до межі Шенона продуктивності радіоканалу передавання при невеликій довжині кодового слова. Квадратурна амплітудна модуляція (QAM) широко використовується в стільникових системах, оскільки модуляція і демодуляція QAM характеризується спрощеною технічною реалізацією в телекомунікаційному обладнанні. Оскільки точки її сузір'я розташовані на різній відстані один від одного тому розподіл далекий від гаусівського. З іншого боку, амплітудно-фазова маніпуляція (APSK) стійка до нелінійності підсилювачів сигналів, а також більш стійка до фазового шуму у порівнянні із іншими форматами модуляції. Таким чином, APSK модуляція використовується в мережах мовлення, супутниковому зв'язку та може бути використана в терагерцовому зв'язку систем 6G. У системах 5G розглядається багато нових форм сигналу, таких як CP-OFDM, банк фільтрів з кількома носійними (FBMC), універсальна фільтрація з кількома носійними (UFMC) та мультиплексування із узагальненим частотним розділенням (GFDM) [8].

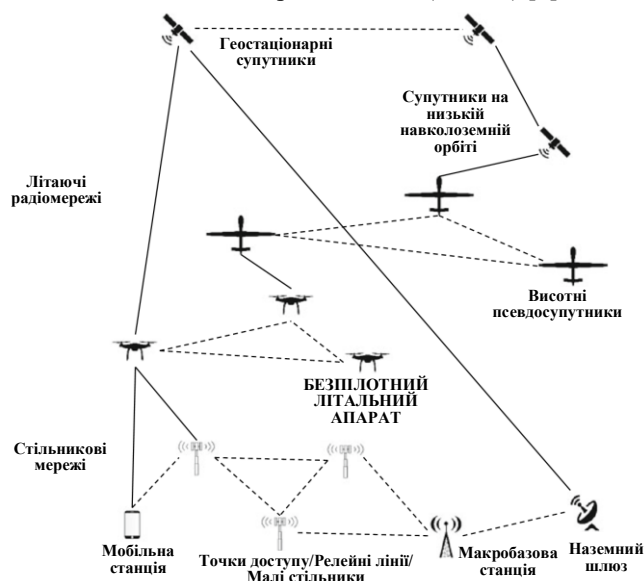


Рис. 2. Структура сегменту інтегрованої мережі 6G

Програмована метаповерхня зумовлює модернізацію фундаментальної апаратної структури бездротових систем передавання, зокрема забезпечується покращення каналного середовища для бездротового зв'язку [3]. Метаповерхні на основі штучних провідних структур та двовимірних матеріалів із субхвильовими структурними схемами, які дозволяють керувати поширенням електромагнітних хвиль. Звичайні метаповерхні мають фіксовану структуру і тому не можуть маніпулювати електромагнітними хвилями. Однак, щоб використовувати їх у системах зв'язку, ми повинні динамічно їх налаштувати та керувати електромагнітними хвилями. Програмовані метаповерхні з реконфігурованими електромагнітними параметрами можуть регулювати фазу, амплітуду, поляризацію та орбітальний кутовий момент електромагнітних хвиль за допомогою керуючого сигналу. На рисунку 3 відображено архітектуру трансивера з використанням програмованої метаповерхні [4]. Передавач (рис. 3 а) складається з блоків кодування та модуляції, сигналу керування та програмованої метаповерхні.

Основною концепцією програмованої метаповерхні в бездротовому зв'язку є керування коефіцієнтом відбиття в термінах модульованих або вихідних даних для створення гнучкого та налаштованого середовища для бездротового зв'язку. Це забезпечує можливість налаштування та управління різними аспектами бездротового зв'язку, такими як швидкість передачі даних, зони покриття, способи передачі сигналу та інші.

Однією з ключових особливостей програмованої метаповерхні в бездротовому зв'язку є підтримка різних бездротових протоколів та стандартів. Це дозволяє користувачам використовувати різні пристрої та технології зв'язку та налаштувати їх відповідно до вимог та потреб. Крім того, програмована метаповерхня в бездротовому зв'язку дозволяє користувачам контролювати інтерференцію та шум у мережі, що забезпечує більш надійну та стабільну роботу бездротової мережі. Вона також дозволяє автоматично визначати та коригувати проблеми зв'язку, що дозволяє забезпечувати високу якість зв'язку та уникнути



можливих перерв у роботі мережі. Крім того, програмована метаповерхня в бездротовому зв'язку дозволяє використовувати аналітичні інструменти та машинне навчання для аналізу та передбачення проблем у мережі. Це дозволяє забезпечувати більш ефективне управління мережею та забезпечувати більш високу якість зв'язку. Коефіцієнт відбиття визначається як відношення комплексної амплітуди відбитої хвилі до амплітуди падаючої хвилі [5].

Звичайний приймач на рис. 3 б складається із блоків синхронізації, оцінювання каналу, вирівнювання, демодуляції та декодування каналу.

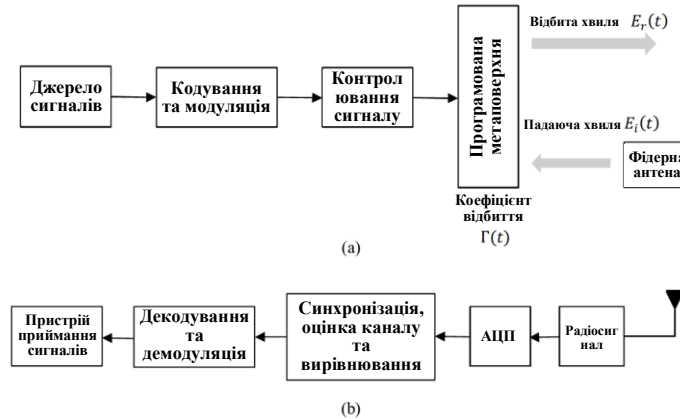


Рис. 3. Схема передавача (а) та приймача (б) з використанням програмованої метаповерхні

Однак, з появою технологій програмно-конфігурованого радіо (SDR) та використання програмного забезпечення для управління мережами (SDN), з'являються нові можливості для автоматизації процесу розгортання та управління мережами. Такі системи можуть бути здатні до автоматичного визначення оптимальної конфігурації мережі та налаштування її параметрів для різних сценаріїв використання. Це дозволяє значно знизити час та витрати на розгортання та підтримку мережі. Системи 6G передбачають більш складні та різноманітні сценарії зв'язку та мережі, що потребують розвитку нових технологій та підходів. Наприклад, системи 6G повинні забезпечувати стабільний зв'язок в умовах високих швидкостей руху автомобілів, роботів-помічників та інших автоматизованих пристроїв. Крім того, системи 6G повинні підтримувати високу рівень безпеки та конфіденційності для захисту персональних даних користувачів у медичних та інших чутливих сферах. Для цього системи 6G повинні використовувати нові технології, такі як обробка даних на основі штучного інтелекту та блокчейн-технології, щоб забезпечити високий рівень надійності та безпеки мережі. Традиційний підхід може не працювати належним чином для підтримки численних вимог 6G. Таким чином, системи 5G NR містять багато нових функцій, таких як розбиття мережі на сегменти для гнучкої підтримки декількох послуг і масштабування для функціональних додатків. Зокрема, це дозволить покращити проектування та оптимізацію систем 6G. Оптимізація систем бездротового зв'язку та мереж в основному пов'язана з багатьма параметрами, такими як складність, вартість, енергія, затримка, пропускна здатність [7].

Алгоритми штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) можуть бути застосовані для вирішення оптимізаційних задач в мережах 6G та сприяти підвищенню продуктивності. Алгоритми ШІ та МН можуть бути використані для оптимізації різноманітних аспектів мережі 6G, включаючи розподіл пропускної здатності, керування відстанню та маршрутизацію. Вони можуть допомогти зменшити час затримки та підвищити швидкість передачі даних в мережах 6G. Крім того, ШІ та МН можуть бути використані для автоматизації керування мережею, що може допомогти зменшити витрати на управління мережею та забезпечити більш ефективне використання ресурсів мережі. Наприклад, алгоритми глибинного навчання можуть бути використані для оптимізації керування каналами зв'язку та розподілу пропускної здатності. Алгоритми підсиленого навчання можуть бути використані для оптимізації маршрутизації, що може знизити час затримки та забезпечити більш ефективне використання ресурсів мережі [8].

Отже, застосування ШІ та МН може підвищити продуктивність мереж 6G, забезпечуючи більш ефективне використання ресурсів та підвищуючи якість обслуговування. Також, алгоритми ШІ та МН корисні для класифікації, кластеризації, регресії, зменшення розмірності та прийняття рішень. Багато компонентів систем 6G тісно пов'язані з ними. Наприклад, проблема розподілу ресурсів і планування є різновидом проблеми класифікації і кластеризації. Оцінювання каналів - це проблема регресії. Декодування Вітербі базується на динамічному програмуванні. Керування мережевим трафіком тісно пов'язане з проблемою прийняття послідовних рішень. Таким чином, алгоритми ШІ та МН стануть ключовими інструментами впровадження мереж 6G.

Одна з ключових переваг алгоритмів ШІ та МН полягає в їх можливості самооптимізації та самонавчання. Алгоритми можуть адаптуватися до нових умов, аналізувати дані про використання системи

та змінювати параметри для досягнення кращих результатів. Це може допомогти забезпечити оптимальну продуктивність та ефективність системи та підвищити якість обслуговування користувачів. Застосування алгоритмів ШІ та МН також може допомогти знизити ризик помилок, пов'язаних з ручним конфігуруванням системи. ШІ можуть виявляти та коригувати помилки в реальному часі, що дозволяє зменшити час та витрати на усунення проблем. Отже, алгоритми ШІ та МН можуть мати значний вплив на оптимізацію фізичного рівня телекомунікаційних мереж, дозволяючи знайти оптимальний спільний дизайн та використовувати нові можливості, такі як самооптимізація та самонавчання. Зокрема, інтелектуальне радіо поєднує алгоритми ШІ та МН, обробку сигналів, теорію зв'язку та технології бездротових мереж. Головна ідея інтелектуального радіо полягає в тому, щоб забезпечити оптимальне використання бездротового спектру шляхом адаптації радіоприймачів та передавачів до змінних умов передачі даних.

У традиційних бездротових мережах канали розділяються на підканали, і кожен підканал виділяється для визначеного типу даних. Однак у великих мережах, де багато користувачів і використовується багато типів даних, це може призвести до неефективного використання спектру. Інтелектуальне радіо може вирішити цю проблему, використовуючи алгоритми ШІ та МН для виявлення вільних підканалів та автоматичного вибору оптимального підканалу для передачі даних. Інтелектуальне радіо також може забезпечити більш ефективне використання спектру шляхом аналізу даних про використання спектру та адаптації до змінних умов. Наприклад, при виявленні завад в спектрі, інтелектуальне радіо може автоматично вибрати оптимальний канал та використовувати ШІ та МН для підтримки якості сигналу [3]. Отже, інтелектуальне радіо є важливою галуззю досліджень, яка поєднує алгоритми ШІ та МН, обробку сигналів, теорію зв'язку та НВІС-технології. На рис. 4 показано порівняння традиційних компонентів фізичного рівня на основі OFDM, компонентів фізичного рівня, що включають МН та обробки фізичного рівня на основі МН.

Як видно з рис. 4, на першому етапі алгоритми МН можуть вносити свій вклад у блокчейн трансивера, які використовуються у фізичному рівні телекомунікаційних мереж. Блокчейн трансивер - це пристрій, який може обмінюватися даними з іншими пристроями через мережу блокчейн. Алгоритми МН можуть допомогти покращити ефективність роботи блокчейн трансивера, забезпечивши оптимальне управління сигналами та зменшення шуму. Крім того, алгоритми МН можуть допомогти вирішувати проблеми взаємодії між різними мережами та пристроями, забезпечивши надійну і безпечну передачу даних через мережу блокчейн. Одним з прикладів використання алгоритмів МН у блокчейн трансиверах є система автоматичної настройки радіочастотних пристроїв, яка дозволяє забезпечувати стабільну роботу пристроїв у різних умовах мережі та довкілля. Це може бути особливо корисно в ситуаціях, коли мережа має низьку якість сигналу або коли пристрої розташовані в умовах шуму та інтерференції. Наскрізнний автокодер для фізичного рівня є одним з підходів до обробки фізичного рівня на основі МН. Наскрізнний автокодер - це глибинна нейронна мережа, яка може використовуватися для автоматичного вивчення репрезентацій об'єктів, що забезпечують взаємозв'язок між вхідними та вихідними даними.

В контексті обробки фізичного рівня, наскрізнний автокодер може використовуватися для знаходження репрезентацій сигналів з різних фізичних датчиків, які підключені до МН. Наприклад, у випадку сенсорної мережі, яка складається з декількох різних типів датчиків, таких як камери, мікрофони, акселерометри, тощо, наскрізнний автокодер може допомогти зіставити дані з цих датчиків та побудувати комплексну репрезентацію вхідного сигналу, що може бути використана для подальшого аналізу і прийняття рішень. Перевагою наскрізного автокодера є те, що він може навчитися корисні репрезентації без необхідності вручну вибирати ознаки та характеристики даних. Крім того, наскрізнний автокодер може бути здатний до виявлення аномалій та відновлення пошкоджених даних, що є корисною властивістю в деяких сценаріях. Однак, наскрізнний автокодер може вимагати значну кількість обчислювальних ресурсів та даних для тренування, що може бути обмежуючим фактором в деяких застосуваннях [4].

Виявлення сигналів і оцінка каналів є важливими компонентами багатьох систем зв'язку та сенсорної мережі. ШІ і МН можуть покращити ці компоненти за допомогою різних методів та технік. Наприклад, у випадку систем зв'язку, ШІ можуть використовуватися для виявлення та розрізнення сигналів, які надходять через різні канали зв'язку, такі як різні антени, а також для покращення якості прийому та передачі сигналу. ШІ можуть використовуватися для зменшення шуму та спотворень, що можуть виникнути в процесі передачі сигналу через канали зв'язку. ШІ також можуть бути використані для покращення відстеження траєкторії та орієнтації об'єктів, що переміщуються, таких як мобільні телефони або дрони. У випадку сенсорної мережі, МН може допомогти виявити сигнали з різних датчиків та обробити їх, щоб отримати більш точні та зрозумілі дані про довкілля. МН може використовуватися для знаходження та ідентифікації різних типів об'єктів та сигналів, таких як звуки, зображення, температура, відстань, тиск тощо. МН може також використовуватися для оцінки каналів зв'язку та зменшення шуму та спотворень у даних, що надходять від різних датчиків. Отже, ШІ і МН можуть покращити виявлення сигналів та оцінку каналів, що може призвести до поліпшення якості зв'язку та більш точної та надійної обробки даних у сенсорних мережах. [5]. Також, глибоке навчання може покращити ефективність виявлення сигналів на фізичному рівні. Тому, глибоке навчання може бути використано для вирівнювання з нелінійними

спотвореннями символів в переданих сигналах. Це можливо завдяки здатності глибоких нейронних мереж здійснювати нелінійні перетворення вхідних даних.

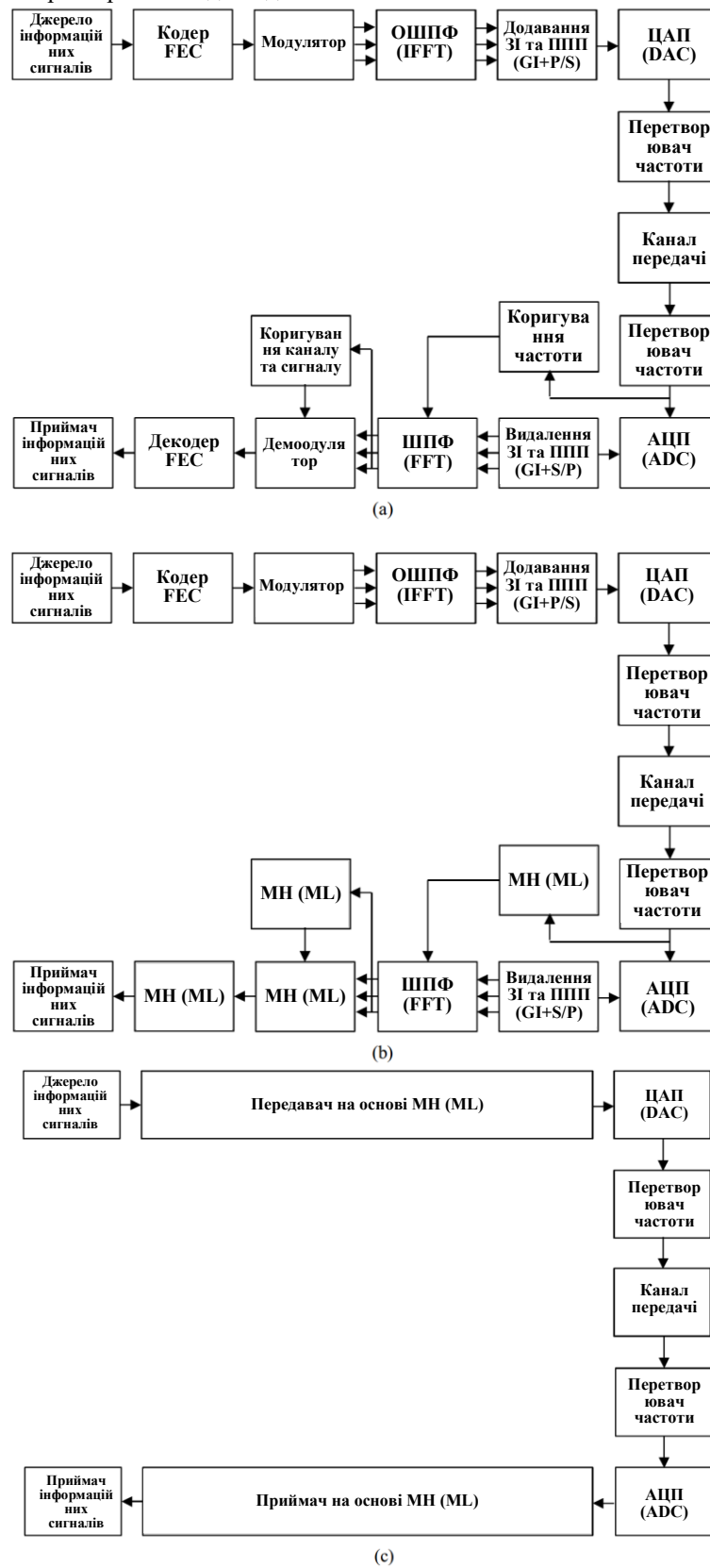


Рис. 4. Блоки фізичного рівня на основі OFDM (а), блоки фізичного рівня з алгоритмом МН в приймачі та обробка на основі МН на фізичному рівні (с)



При зіставленні отриманого сигналу з переданим без класичного порогу виявлення, глибокі нейронні мережі можуть використовуватися для навчання моделі, яка може відновлювати переданий сигнал з нелінійними спотвореннями, враховуючи характеристики каналу зв'язку та шуму. Така модель може бути навчена на великій кількості прикладів переданих сигналів з відомими нелінійними спотвореннями та відповідними чистими сигналами. Після навчання, модель може бути застосована для відновлення чистого сигналу з отриманого сигналу з нелінійними спотвореннями. Таким чином, застосування глибокого навчання може забезпечити більш точне відновлення переданих сигналів з нелінійними спотвореннями без необхідності використання класичних порогів виявлення, що може покращити якість зв'язку та зменшити вплив шумів на передачу даних. Такий підхід забезпечує кращу продуктивність, ніж класичне виявлення MMSE [6].

Методи ШІ та МН можуть допомогти знайти оптимальний шлях, вибрати обслуговуючі комірочки та забезпечити хорошу якість обслуговування в системах зв'язку. Застосування методів ШІ та МН дає можливість збирати та обробляти великі обсяги даних з різних джерел, що дає змогу зробити більш точні та ефективні рішення. Також, застосування методів ШІ та МН в мережевому рівні може бути корисним для різних задач, таких як прогнозування трафіку, оптимізація розподілу ресурсів мережі, визначення оптимального маршруту між двома вузлами, розпізнавання аномальних паттернів трафіку [4].

Використання методів ШІ та МН в системах зв'язку може допомогти вирішити багато проблем, з якими стикаються оператори мобільного зв'язку, такі як забезпечення якості обслуговування (QoS), оптимізація маршрутизації, зниження витрат на енергопотребу та покращення загальної продуктивності мережі [5]. Крім того, вони підходять для збалансування трафікового навантаження мереж і поліпшення загальних послуг мереж шляхом знаходження оптимального балансування навантаження. У табл. 1 відображено великий потенціал ШІ та МН для покращення ефективності, надійності та безпеки бездротових мереж.

Таблиця 1.

**Потенціал ШІ та МН для підвищення ефективності, надійності та безпеки бездротових мереж**

Завдання бездротової системи	Фізичний рівень	Канальний рівень передачі даних	Мережа та верхні рівні
Завдання штучного інтелекту			
Кластеризація	Виявлення сигналів, відображення символів	Кластеризація та об'єднання користувачів	Створення критичної мережі, Керування розміром кластера в динамічних гетерогенних мережах
Класифікація	Позиціонування, локалізація, визначення користувачів МІМО	Динамічне планування, Агрегація операторів, Оптиміальна багатозв'язність	Допуск нарізки, планування, балансування навантаження
Регресія	Оцінювання каналів, вирівнювання	Адаптивне керування живленням	Динамічне керування зрізами
Прогнозування	Оцінювання сліпих каналів	Адаптивне керування потужністю, прогнозування радіосигналу, розподіл радіоресурсу	Моніторинг мережі, Оркестрування, Прогнозування трафіку, Прогнозування мобільності
Прийняття рішень	Кодування з виправленням помилок	Зменшення завад, передача	Управління мобільністю, Оптиміальний маршрут

Їхні методи можуть бути використані для підвищення продуктивності та зменшення накладних витрат в системах 6G. Зокрема, методи ШІ та МН можуть бути використані для покращення керування ресурсами, оптимізації маршрутизації, підвищення надійності та зменшення затримок. ШІ можуть бути використані для розв'язання складних проблем у бездротових мережах, таких як розрідженість, нестабільність та забезпечення безпеки. Наприклад, вони можуть бути використані для розв'язання проблеми підключення великої кількості масово підключених пристроїв, що є ключовою функцією систем 6G. МН можуть допомогти вирішити проблему керування великою кількістю малопотужних пристроїв в мережі, забезпечивши оптимальну взаємодію між пристроями та базовими станціями. Вони також можуть бути використані для розробки ефективних алгоритмів маршрутизації, які можуть допомогти забезпечити оптимальну доставку даних в мережі [6]. У цілому, використання методів ШІ та МН може допомогти покращити ефективність та безпеку мереж та забезпечити кращу якість обслуговування для користувачів.

Отже, очікується, що системи 6G будуть мати набагато більші вимоги до пропускної здатності, затримки та енергоефективності порівняно з попередніми поколіннями мобільних систем зв'язку. За очікуваннями, 6G має надавати швидкість передачі даних на рівні до 1 Тбіт/секунду, що є в 100 разів швидше, ніж найбільша швидкість передачі даних в системах 5G. Щодо затримки, очікується, що 6G забезпечить зменшення затримки до менше 1 мілісекунди. Це можливо завдяки новим технологіям передачі

даних, таким як використання міліметрових хвиль та масивів антен. Крім того, енергоефективність 6G буде ще більшою, що дозволить зменшити споживання енергії на передачу одиниці даних. Це можливо завдяки розвитку нових технологій передачі даних, таких як використання світлових хвиль та надширококутних радіохвиль. В цілому, системи 6G матимуть значно покращені характеристики порівняно з попередніми поколіннями мобільних систем зв'язку, що дозволить забезпечити більш ефективну та швидку передачу даних [7]. Системи 6G стикаються з новими викликами, які ставлять під сумнів поточні методи та підходи до розробки мереж зв'язку. Для того, щоб успішно вирішувати ці виклики, системи 6G будуються на основі концепції "розумної комунікації" та "розумної мережі", яка дозволяє створювати мережі зв'язку з високим рівнем гнучкості, масштабованості, стійкості, безпеки, ефективності та розподіленого інтелекту. Одним з головних викликів для систем 6G є необхідність підвищення ефективності використання ресурсів мережі зв'язку, оскільки обсяги передачі даних виростають з кожним новим поколінням мобільних мереж. Щоб вирішити цей виклик, системи 6G мають базуватися на принципах розподіленого інтелекту, який дозволяє збільшувати продуктивність та ефективність мережі шляхом розподілу обчислювальних завдань між різними вузлами мережі. Одним із головних напрямків розвитку систем 6G є забезпечення високого рівня безпеки та приватності в мережах зв'язку. З метою забезпечення безпеки мереж зв'язку, системи 6G повинні базуватися на криптографічних методах з використанням квантових ключів та інших інноваційних методів. Також, системи 6G повинні мати високий рівень гнучкості та масштабованості, щоб забезпечувати мережеву інфраструктуру для різних сфер застосування, включаючи промисловість, транспорт, медицину [8].

Технології штучного інтелекту та машинного навчання допоможуть задовольнити вказані вимоги та створити нові послуги. Однак, завдання ШІ та МН можуть бути дуже обчислювально важкими та потребувати великої кількості ресурсів, включаючи обчислювальну потужність, пам'ять та пропускну здатність мережі зв'язку. Ці завдання можуть також містити безліч вузьких місць, які слід враховувати при застосуванні їх в бездротових системах. Одним з найважливіших вузьких місць є обмежені ресурси, які доступні для мобільних пристроїв та бездротових мереж. Низькопотужні пристрої, такі як датчики IoT, можуть мати дуже обмежену обчислювальну потужність та пам'ять, тоді як великі мобільні пристрої, такі як смартфони, можуть бути обмежені пропускну здатністю мережі зв'язку. Таким чином, дуже важливо враховувати ці обмеження при розробці та використанні систем ШІ та МН в бездротових мережах. Ще одним вузьким місцем може бути нестабільність зв'язку та перешкоди в мережі. Нестабільний зв'язок може призвести до переривання передачі даних та помилок в роботі системи ШІ та МН. Також, перешкоди в мережі можуть знизити пропускну здатність та збільшити затримки в мережі, що може суттєво впливати на продуктивність системи. Для успішного використання систем ШІ та МН в бездротових мережах необхідно розробляти алгоритми та методи, які забезпечують ефективне використання ресурсів мережі та пристроїв [9]. Наприклад, для отримання точних результатів при вирішенні завдань ШІ та МН необхідно мати достатню кількість якісних навчальних даних. Це може бути одним з викликів при розробці та застосуванні систем ШІ та МН. Для навчання моделей ШІ та МН необхідно мати навчальні дані, які відображають реальність та покривають різноманітність можливих сценаріїв. Ці дані можуть бути дорогою із-за високих вимог до їх якості та кількості. Наприклад, для тренування моделей глибокого навчання потрібно від 10 тисяч до мільйонів прикладів. Також, навчальні дані повинні бути коректно позначеними та етикетованими, щоб моделі могли вчитися на прикладах з правильними відповідями. Неправильні або неякісні дані можуть призвести до неточностей в результаті моделі. Однак, деякі методи, такі як transfer learning, дозволяють використовувати попередньо навчені моделі та навчальні дані для тренування нових моделей для конкретних задач. Це дозволяє зменшити кількість необхідних навчальних даних та спростити процес тренування нових моделей. У цілому, наявність якісних навчальних даних є важливим фактором для успішного вирішення завдань ШІ та МН [1]. Однак, розробники можуть використовувати різні методи та технології для оптимізації використання наявних даних та зменшення кількості необхідних даних для навчання моделей.

Іноді при обробці персональних даних на пристроях може статися передача цих даних іншим особам. Це може статися, наприклад, якщо пристрій використовує хмарні сервіси для збереження та обробки даних, або якщо використовується додаток, який передає дані до сторонніх серверів. У таких випадках важливо забезпечити захист персональних даних та дотримання принципів конфіденційності та приватності. Наприклад, можна використовувати шифрування та інші методи захисту даних на пристроях, щоб унеможливити доступ до них неповідомим особам. Також можна обрати додатки та сервіси, які мають відповідні політики конфіденційності та приватності, та дотримуються правил обробки персональних даних. Для забезпечення захисту персональних даних важливо дотримуватися необхідних заходів безпеки та перевіряти джерела програмного забезпечення, які використовуються на пристроях та сервісах, щоб уникнути можливих ризиків порушення конфіденційності та приватності [2].

Основні тенденції розвитку 6G передбачають підтримку вертикалей (тобто використання в різних галузях, таких як медицина, автомобільна промисловість, промисловість 4.0), підтримку різних типів мережевих архітектур, широке використання віртуалізації, підтримку мільйонних зв'язків, зв'язок на основі

даних і мережі зі штучним інтелектом і машинним навчанням. Крім того, співпраця між різними галузями та секторами стане основним рушієм у розвитку бездротових систем 6G.

Розглянуте кодування каналів є важливою частиною розробки мереж 6G, оскільки воно дозволяє забезпечити високу якість передачі даних. Багатокористувацькі канали використовуються для підвищення ефективності використання ресурсів мережі і забезпечення кращої співпраці між користувачами. Недвійкове LDPC і турбо-кодування є популярними методами кодування, які забезпечують високу ефективність кодування і дозволяють досягнути низької помилковості передачі. Крім того, передача кодових слів короткої довжини є важливою для забезпечення низької затримки і високої пропускної здатності. Нові модуляції і форми сигналів також досліджені для забезпечення високої пропускної здатності і низької затримки. Наприклад, використання мультиплексування сигналів може допомогти забезпечити високу пропускну здатність, а використання нових форм сигналів, таких як OFDM, може допомогти забезпечити низьку затримку. Загалом, дослідження в галузі кодування каналів і модуляції сигналів є ключовими для розробки ефективних мереж 6G.

Програмована метаповерхня - це інтерфейс, який дозволяє користувачам створювати та керувати власними робочими середовищами, використовуючи набір інструментів та можливостей, що надаються платформою. Основна концепція програмованої метаповерхні полягає у тому, що користувач може налаштувати робоче середовище згідно зі своїми потребами та вимогами, використовуючи готові компоненти, які надаються платформою.

Основні елементи програмованої метаповерхні включають в себе інтерфейс користувача, який дозволяє створювати та налаштовувати робочі середовища, та набір інструментів, які дозволяють виконувати різноманітні дії, такі як створення та редагування вмісту, організація робочих процесів та інше. Однією з основних переваг програмованої метаповерхні є те, що користувачі можуть легко налаштувати робоче середовище згідно зі своїми потребами, що дозволяє їм бути більш продуктивними та ефективними в своїй роботі. Крім того, програмована метаповерхня надає можливість розширення функціональності за допомогою додатків та плагінів, що дозволяє користувачам розширювати можливості своїх робочих середовищ.

Розглянуто основні переваги використання відкритого радіочастотного діапазону (O-RAN) для мобільних операторів. Нижча вартість мережевого обладнання: O-RAN забезпечує мобільним операторам можливість використання змішаних компонентів різних виробників, що дозволяє знизити вартість мережевого обладнання і підтримки мережі. Ширша адаптація: O-RAN дозволяє мобільним операторам більш гнучко використовувати мобільне обладнання. Основні переваги O-RAN включають нижчу вартість мережевого обладнання, більшу адаптацію, вищу продуктивність мережі, вищу інтегруєбельність і кращу безпеку. O-RAN - це відкритий стандарт для побудови мобільних мереж на базі програмного забезпечення, який дозволяє операторам замінювати традиційне закрите обладнання на мережеве обладнання з відкритими інтерфейсами. Це дозволяє мобільним операторам змінювати обладнання та додавати нові функції до мережі без необхідності заміни всієї мережі. Крім того, це дозволяє операторам знизити вартість мережевого обладнання і підвищити ефективність мережі. Вища продуктивність мережі: O-RAN може допомогти мобільним операторам забезпечити більш високу продуктивність мережі, зокрема шляхом розподілу завдань між різними компонентами мережі і збільшенням швидкості передачі даних. Вища інтегруєбельність: O-RAN підтримує використання різних компонентів мережі різних виробників, що забезпечує вищу інтегруєбельність і дозволяє мобільним операторам з легкістю змінювати склад компонентів мережі відповідно до змінних потреб. Краща безпека: O-RAN забезпечує більш високий рівень безпеки, зокрема шляхом використання відкритих стандартів для забезпечення безпеки мережі і протоколів. Отже, використання відкритого радіочастотного діапазону (O-RAN) дозволяє мобільним операторам забезпечити більш гнучкий підхід до мережевого проектування і підтримки мережі.

#### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

В результаті дослідження систем 6G, було визначено декілька відмінностей між стільниковими системами 5G та системами 6G. Більша пропускну здатність: системи 6G мають значно більшу пропускну здатність, ніж 5G. Це дозволяє передавати більше даних за короткий час. Менша затримка: системи 6G будуть мати меншу затримку порівняно з 5G, що дозволить використовувати їх для реального часу додатків. Краща енергоефективність: системи 6G мають бути більш енергоефективними, що дозволяє їм працювати довше з однією зарядкою, і тим самим зменшує негативний вплив на довкілля. Нові можливості: системи 6G дозволяють впровадження нових додатків, які не були доступні на попередніх поколіннях мереж мобільного зв'язку, таких як взаємодія між машинами та додатки для розширеної реальності. Більша надійність: системи 6G будуть мати більшу надійність та стійкість, що дозволяє використовувати їх для критичних додатків, таких як системи здоров'я та автономних транспортних засобів.

Зокрема, визначено 5 ключових сценаріїв використання систем 6G. Додатки для обробки великих обсягів наукових даних - використання високошвидкісної передачі даних для наукових досліджень та обробки великих обсягів даних. Переадресація пакетів даних з урахуванням додатків - системи 6G можуть

використовуватися для оптимізації маршрутизації даних в мережах з високою мобільністю та забезпечити ефективний обмін даними між пристроями. Порятунком при надзвичайних ситуаціях і катастрофах - системи 6G можуть бути використані для забезпечення швидкого та надійного зв'язку під час надзвичайних ситуацій та катастроф. Соціалізований Інтернет речей - системи 6G можуть підтримувати більш широку мережу з'єднань між пристроями, що дозволить створити соціальні мережі між об'єктами Інтернету речей та підтримувати машинне навчання та інші ШІ застосування. Зв'язок і обмін широко розподіленими даними, моделями і знаннями в області ШІ - системи 6G можуть бути використані для обміну даними, моделями та знаннями між різними пристроями, що дозволяє збільшити точність та ефективність ШІ алгоритмів.

Досліджено основну ідею мережі 5G vRAN та Open RAN, яка полягає у відокремленні програмного забезпечення від апаратного забезпечення та використання функції RAN на готових комерційних серверах (Commercial Off-the-Shelf, COTS). Такий підхід дозволяє мобільним операторам модулювати мережеві функції і зменшити операційні витрати. Технології vRAN та Open RAN впроваджують концепцію віртуалізації та підвищують ефективність мережевого обладнання. Однак ключовою характеристикою мережі Open RAN є характерна відкритість для забезпечення можливості працювати будь-якому постачальнику програмного забезпечення з обладнанням на основі COST через відкритий інтерфейс.

Досліджена програмована метаповерхня, що складається з елементів, розмір яких значно менше довжини хвилі, що проходить через цю структуру. Для бездротового зв'язку програмовані метаповерхні можуть використовуватись для покращення каналного середовища, зменшення втрат сигналу та підвищення ефективності передачі даних. Це досягається за допомогою маніпулювання електромагнітними полями, що проходять через програмовану метаповерхню. Шляхом зміни форми, розміру і розташування елементів програмованої метаповерхні можна контролювати властивості проходження електромагнітних хвиль. Таким чином, програмовані метаповерхні можуть допомогти забезпечити більш стабільний і швидкий бездротовий зв'язок, що є важливим для розвитку таких технологій, як Інтернет речей, де велика кількість пристроїв повинна бути з'єднана в одну мережу.

#### Література

1. ITU-T, FG NET-2030 Technical Report on Network 2030. Additional Representative Use Cases and Key Network Requirements for Network 2030 (June 2020)
2. T. Nakamura, 5G evolution and 6G. in International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT) (2020), pp. 1–1. <https://doi.org/10.1109/VLSI-DAT49148.2020.9196309>
3. Strategic Research and Innovation Agenda 2021–2027, European Technology Platform Net World2020, Smart Networks in the context of NGI (September 2020). <https://5g-ia.eu/sns-horizon-europe/>.
4. W. Tang, X. Li, J.Y. Dai, S. Jin, Y. Zeng, Q. Cheng, T.J. Cui, Wireless communications with programmable metasurface: transceiver design and experimental results. *J. China Commun.* 16(5), 46–61 (2019)
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>
9. Васильківський, М., Варгатюк, Г., & Болдирева, О. (2022). Інтелектуальна оптимізація інфокомунікаційних мереж множинного доступу. *Вісник Хмельницького національного університету*, (6), 32–39. [https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6\(2\)-32-39](https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-32-39)

#### References

1. ITU-T, FG NET-2030 Technical Report on Network 2030. Additional Representative Use Cases and Key Network Requirements for Network 2030 (June 2020)
2. T. Nakamura, 5G evolution and 6G. in International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT) (2020), pp. 1–1. <https://doi.org/10.1109/VLSI-DAT49148.2020.9196309>
3. Strategic Research and Innovation Agenda 2021–2027, European Technology Platform Net World 2020, Smart Networks in the context of NGI (September 2020). <https://5g-ia.eu/sns-horizon-europe/>.
4. W. Tang, X. Li, J.Y. Dai, S. Jin, Y. Zeng, Q. Cheng, T.J. Cui, Wireless communications with programmable metasurface: transceiver design and experimental results. *J. China Commun.* 16(5), 46–61 (2019)
5. Vasylykivskiy M., Nikitovych, D., & Boldyreva, O. (2022). Keruvannya dostupom do informatsiynykh danykh v intelektual'nykh infokomunikatsiynykh merezhakh. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 5–17. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-1>

6. Vasykivskyi M., Varhatiuk, H., & Boldyreva, O. (2022). Doslidzhennya arkhitektury shtuchoho intelektu dlya infokomunikatsiynykh merezh 6G. Measuring and computing devices in technological processes, (4), 62–70. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-7>
7. Vasykivskyi M., Kolomiets, A., & Hrabchak, N. (2022). Doslidzhennya funktsional'nykh parametriv infokomunikatsiynykh merezh 6G. Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu, (6), 46–52. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-46-52>
8. Vasykivskyi, M., Kolomiets, A., & Budash, M. (2022). Otsinyuvannya parametriv radiotraktiv infokomunikatsiynykh system 5G/6G. Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu, (6), 53–60. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-53-60>.
9. Vasykivskyi, M., Varhatiuk, H., & Boldyreva, O. (2022). Intelektualna optymizatsiia infokomunikatsiynykh merezh mnozhynnoho dostupu. Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu, (6), 32–39. [https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6\(2\)-32-39](https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6(2)-32-39)