

Микола ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ
Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-6586-2563>
e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com
Ганна ВАРГАТЮК
Вінницький національний технічний університет
e-mail: annaantonuik@gmail.com
Ольга БОЛДИРЕВА
Вінницький національний технічний університет
e-mail: rtt13bpoldenko@gmail.com

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ

Досліджено методи множинного доступу із мультиплексуванням ресурсів та розглянуто переваги і недоліки ортогонального множинного доступу (ОМА) і неортогонального множинного доступу (НОМА). Також виконано порівняльний аналіз схем передачі даних в радіомережі із врахуванням планування ресурсів, зокрема: передачі зі службовою інформацією та передачі без службової інформації. Запропоновано структуру приймача висхідного каналу NOMA на основі сигналів OFDM.

Досліджено особливості забезпечення надмасивного підключення в межах обмежених радіоресурсів на основі безгрантового доступу за допомогою NOMA. При цьому, було розглянуто способи вирішення проблем, що властиві поточним застосуванням GF-передачі та NOMA при реалізації надмасивного підключення до мережі доступу на основі технології 6G.

Визначено перспективи впровадження передавача із штучним інтелектом на основі схеми передачі множинного доступу з низькою вартістю, низьким PAPR, малою затримкою, високою надійністю та широкими можливостями підключення. А також розглянуто особливості проектування приймача зі штучним інтелектом при застосуванні методів штучного інтелекту / машинного навчання, які можуть відіграти роль у полегшенні проектування MUD для NOMA.

Ключові слова: множинний доступ, технологія 6G, штучний інтелект, міжканальна завада, міжсимвольна завада, обладнання користувача, канал передавання даних.

Mykola VASYLKIVSKYI, Ganna VARGATYUK, Olha BOLDYREVA
Vinnytsia National Technical University

INTELLIGENT OPTIMIZATION OF MULTIPLE ACCESS INFOCOMMUNICATION NETWORKS

The methods of multiple access with multiplexing of resources are studied and the advantages and disadvantages of orthogonal multiple access (OMA) and non-orthogonal multiple access (NOMA) are considered. A comparative analysis of data transmission schemes in the radio network was also performed, taking into account resource planning, in particular: transmission with service information and transmission without service information. The structure of the NOMA uplink receiver based on OFDM signals is proposed.

The peculiarities of providing supermassive connection within limited radio resources on the basis of grantless access using NOMA have been studied. At the same time, methods of solving the problems inherent in the current application of GF-transmission and NOMA in the implementation of supermassive connection to the access network based on 6G technology were considered.

Prospects for the introduction of an artificial intelligence transmitter based on a multiple access transmission scheme with low cost, low PAPR, low delay, high reliability and wide connectivity are determined. And features of artificial intelligence receiver design using artificial intelligence / machine learning techniques that can play a role in facilitating MUD design for NOMA are also considered.

Keywords: multiple access, 6G technology, artificial intelligence, inter-channel interference, inter-symbol interference, user equipment, data transmission channel.

Постановка проблеми

У бездротовому зв'язку дані передаються між пристроями за допомогою радіоресурсів. Основними фізичними радіоресурсами є час та частота. Проблема множинного доступу (МА) виникає при необхідності обслуговування декількох користувачів, використовуючи ресурси з обмеженими ступенями свободи [1]. Схеми МА не може складатися лише з одного модуля. Натомість вона зазвичай включає кілька модулів обробки сигналів на фізичних каналах, таких як кодування, модуляція, попереднє кодування, картування ресурсів, керування потужністю та форми сигналів. Пропускна здатність одного наскрізного каналу передавання з топологією «точка-точка» є максимальною. Особливість технології множинного доступу полягає в тому, що деякі модулі можуть бути спроектовані спеціально для спільної роботи кількох користувачів або так, щоб максимізувати пропускну здатність системи в цілому. Це особливо актуально, при великій кількості користувачів із одночасно доступними всіма ступенями свободи [2].

Аналіз останніх джерел

Обслуговування в мережах 6G різноманітних клієнтів із жорсткими та екстремальними вимогами спричиняє необхідність у масштабованій структурі МА, із врахуванням наступних вимог [3]. Для забезпечення можливості роботи з усіма типами розмірів пакетів, які можуть змінюватись від величезних

голограм в службах XR до кількох байтів оновлень статусу промислових датчиків або датчиків моніторингу стану здоров'я механізм МА має бути адекватно масштабованим. Різні розміри пакетів відповідають різній тривалості передачі та різним рівням диверсифікації. Оскільки, до однієї і тієї ж мережі матимуть доступ різні категорії пристроїв, від високоінтелектуальних автомобілів до роботів та надзвичайно недорогих датчиків, які характеризуються значними відмінностями у можливостях обробки сигналів, часової та частотної синхронізації, функціональних параметрів обладнання та засобів живлення можуть пред'являти дуже різні вимоги до МА. Враховуючи, що за 10 років кількість підключень пристроїв приватного, спільного та промислового застосування збільшиться вдесятеро, ця перспектива змушує враховувати потребу у надмасивних підключеннях при проектуванні множинного доступу в мережах 6G [4]. Різноманітність послуг також призводить до різноманіття типів трафіку, що відображається в різних схемах надходження трафіку, а також у різноманітних вимогах до швидкості передачі даних, затримки та надійності. Тому, схема МА в мережі 6G має бути досить масштабованою, щоб ефективно обслуговувати користувачів з довгими пакетами, періодичними та спорадичними моделями трафіку. Ефективне мультиплексування користувачів із різними крайніми вимогами до продуктивності – ще одна проблема, яка досі повністю не вирішена у 5G навіть із використанням трафіку eMBB, URLLC та mMTC. Спроба перекласти все навантаження на MAC планувальник не буде досить ефективним рішенням, тому необхідно розглянути міжрівневі схеми [1]. Мережа 6G забезпечуватиме тривимірне покриття з NAPS, БПЛА та VLEO як частину RAN. Розширення потенційних сценаріїв розгортання поставить нові завдання проектування 6G МА. Однією з типових проблем для інтегрованого неземного доступу є потенційно велика неузгодженість у часі та обмежений бюджет каналу через великі відстані поширення. Додатковим новим напрямком для дослідження є механізми МА, що включають спільну передачу кількох рівнів 3D RAN [2].

Методи МА при мультиплексуванні ресурсів можна поділити на дві категорії: ортогональний множинний доступ (OMA) і неортогональний множинний доступ (NOMA). Крім того, існують дві схеми, пов'язані з процедурами передачі із врахуванням планування ресурсів: передачі зі службовою інформацією (GB) та передачі без службової інформації або безгрантової передачі (GF). В результаті, обидва методи МА та схеми передачі застосовуються як для передачі даних типу GB, так і GF.

Метою роботи є: підвищення ефективності інфокомунікаційних радіомереж за рахунок оптимальної комбінації технологій множинного доступу та ефективного використанні ресурсів систем передавання даних.

Виклад основного матеріалу

У попередніх поколіннях мереж ортогональний доступ був домінуючою схемою. Термінологія "ортогональний" вказує на існування незалежного ступіню свободи, що належить кожному користувачеві, принаймні в одній з областей, включаючи частоту, час, код та простір. При цьому, на передачу окремого користувача не впливають одночасні передачі інших користувачів. Виходячи з ресурсів, які поділяють, щоб розрізнити множину користувачів, можна виділити наступні схеми OMA: множинний доступ із частотним поділом (FDMA), множинний доступ із часовим поділом (TDMA), множинний доступ із кодовим поділом (CDMA), множинний доступ із просторовим поділом каналів (SDMA) та множинний доступ з ортогональним частотним поділом каналів (OFDMA) [2].

Для підключення декількох користувачів до мережі доступу система FDMA виділяє неперекривні смуги частот кожному користувачу або потоку даних у форматі виділених каналів. Для повного усунення завад від сусідніх користувачів передбачено використання захисних смуг, що знижує ефективність використання спектра системи передавання загалом. Таким чином, FDMA недостатньо ефективний і не дозволяє значній кількості користувачів отримати доступ до мережі. Система TDMA ділить часову область на безліч часових інтервалів (тайм-слотів). Передавач використовує дані слоти для передачі даних різним користувачам. Біти корисного навантаження кожного користувача поділяються за часом і відправляються пакетами в доступні відповідні часові інтервали. Таким чином, у мережі можна розмістити лише обмежену кількість користувачів або потоків даних. У системі CDMA часові та частотні ресурси можуть одночасно використовуватися кількома користувачами або потоками даних. За допомогою кодів розширення користувачі або потоки даних можна поділити на ортогональні або напівортогональні (також відомі як майже ортогональні). Дуже довгі послідовності необхідні для досягнення хорошого вирашу при обробці, а ортогональність потрібна для розміщення великої кількості користувачів. При цьому, така система передавання характеризується недостатньою гнучкістю для роботи з великою смугою пропускання та масивним MIMO. Стандарт OFDMA розроблено на основі сигналів OFDM. Він забезпечує жорстке та ортогональне розташування піднесучих у частотній області із їх рознесенням в часі, що дорівнює зворотній тривалості символу. У системі OFDMA часова та частотна площа поділяються на двовимірний розподіл. Мінімальну одиницю розподілу називають ресурсним елементом (RE), що складається з однієї піднесучої (або тону) в частотній області та одного символу в часовій області. Кожен RE передає модульований символ, що належить одному користувачеві або потоку даних. Таким чином досягається максимальна гнучкість ресурсів, які можна легко поєднувати з такими функціями, як масивний MIMO. Однак стандарт висуває високі вимоги до часової та частотної синхронізації, обслуговування якої може бути занадто дорогим для дуже дешевих та малопотужних телекомунікаційних і радіотехнічних пристроїв. З розвитком сучасних технологій MIMO з'явився стандарт SDMA –ефективний варіант для використання з масивними

антенними ґратами [3]. У системі SDMA аналоговий чи цифровий формувач променю може створювати кілька сфокусованих просторових променів для виділених запланованих користувачів. У поєднанні з ідеальною інформацією про стан каналу промені для запланованих користувачів можуть бути майже ортогональними один одному, як це потрібно для мінімізації завад між користувачами. Однак ортогональністю SDMA багато в чому залежить від точності інформації про канал. На жаль, через зростаючу кількість користувачів і спорадичність трафіку її стає важко відстежувати.

Хоча, для покращення пропускної спроможності системи, зручності користувачів та збільшення кількості підключень можна використовувати різні схеми на основі ОМА, однак все ще залишаються обмеження та прогалини, які необхідно усунути, для задоволення різноманітних та дуже жорстких вимог до послуг у мережах 6G. Зокрема, можна виділити такі проблеми: обмеження кількості користувачів, що одночасно можуть обслуговуватися: кількість користувачів або потоків даних строго обмежена кількістю ортогональних каналів у системі ОМА; високі накладні витрати на службові дані та ресурси для гарантії ортогональності: ортогональність у системі ОМА зазвичай гарантується наданням ресурсів, що надсилаються базовими станціями користувачам до того, як може розпочатися будь-яка передача в будь-якому напрямку, включаючи висхідні, низхідні або прямі лінії передавання. При збільшенні кількості користувачів збільшуються пропорційно накладні витрати на обробку сигналів, зменшуючи пропускну здатність системи загалом. Більше того, для певних послуг IoT динамічна обробка грантів може або вводити неприпустиму затримку, або займати більше 50% корисного навантаження під час кожної передачі. Обидва випадки є неприйнятними з точки зору ефективності використання спектра та енергоефективності. Ортогональність може бути гарантована за допомогою попередньо налаштованих ресурсів, але накладні витрати на ресурси все одно залишаються більшими, особливо коли трафік поводить непередбачувано та спорадично; сильна залежність від точного знання інформації про канал передавання при використанні попереднього кодування зі зворотним зв'язком, оскільки у реальних сценаріях розгортання продуктивність розрахованої на багато користувачів системи МІМО зі зворотним зв'язком (MU-МІМО) і координованої багатоточкової передачі/прийому (CoMP) все ще далека від теоретичних границь, особливо для користувачів високошвидкісного мобільного зв'язку. Тому, при порушенні мережі доступу, отримання точної інформації неможливе, і в результаті погіршується якість роботи систем MU-МІМО або CoMP із зворотним зв'язком. Це може виникнути у випадках старіння каналу, затримки зворотного зв'язку або виражених міжсотових завадах, які зазвичай трапляються на практиці [4]. Для подолання обмеження ОМА, було розроблено технологію неортогонального множинного доступу (NOMA), яка є стійкою до конфлікту ресурсів в ортогональних каналах. З точки зору теорії мережевої інформації [3, 4] як для висхідного каналу MA [5], так і для низхідного ширококомовного каналу [6] сукупна пропускна здатність для декількох користувачів NOMA може бути більшою порівняно з паралельною передачею для одного і того ж набору користувачів на основі ортогонально розділених ресурсів. Доведено, що такі методи, як послідовне придушення завад [5] та попереднє кодування Коста [6] на базових станціях, дозволяють досягти оптимальних значень пропускної спроможності для MA каналу і каналу BC відповідно. Більш того, NOMA може підтримувати подальшу суперпозицію сигналів в ортогональному підпросторі під час передачі MU-МІМО. Інтегруючи кодову частину схеми NOMA у передачу MU-МІМО висхідної лінії зв'язку, можна отримати додатковий вииграш у пропускну здатності навіть для системи з 64 приймальними антенами [7].

У багатьох сценаріях побудови інфокомунікаційних мереж доступу важлива не пропускна здатність для одного користувача, а кількість користувачів, які можуть бути обслужені з гарантованою цільовою швидкістю. У цьому сенсі NOMA можна розглядати як механізм, який обмінює пікову швидкість передачі даних одного підключення на більшу кількість підключень [8]. Це досягається за рахунок використання приймачів NOMA для придушення сусідніх завад між користувачами. Це надзвичайно корисно в ІоЕ, при використанні значної кількості пристроїв із не високими вимогами до швидкості передачі даних. У поєднанні з MU-МІМО технологія NOMA переважно сприяє збільшенню кількості користувачів, що обслуговуються в мережі доступу, ніж простому нарощуванню кількості передавальних або приймальних антен.

Таким чином, при ефективній конструкції приймача технологія NOMA може забезпечити наступні невід'ємні переваги перед ОМА: збільшення пропускної здатності розрахованої для значної кількості користувачів системи: як доведено теорією мережевої інформації, NOMA додатково збільшує пропускну спроможність системи, не використовуючи додаткові спектральні ресурси або антени; підтримка перевантаженої передачі, оскільки технологія NOMA додатково збільшує загальну кількість підключень за рахунок підвищення допустимої колізії символів у ортогональних каналах. При цьому система вважається перевантаженою. Але, завдяки відповідній схемі розрахованого на багато користувачів детектування (MUD) і кодовим книгам NOMA, які можуть включати багатовимірні комбінації [1], сигнатури розбіжності [2] і шаблони конфліктів ресурсів [3], може бути досягнутий коефіцієнт перевантаження вище 300%. В результаті, коефіцієнт перевантаження визначається як співвідношення між кількістю користувачів, до яких одночасно здійснюється доступ, і кількістю ортогональних RE; для уникнення великих накладних витрат на сигнальний механізм і зменшення затримки встановлення зв'язку, заснованої на використанні службової інформації запропоновано використовувати безгрантову передачу, що особливо підходить для послуг з невеликими розмірами пакетів та спорадичним трафіком. Маючи стійкість до конфліктів символів, безгрантовий механізм з підтримкою технології NOMA може реалізувати більш агресивне спільне

використання ресурсів між великою кількістю користувачів, зберігаючи при цьому той самий рівень цільової надійності; для подолання вузького місця, що пов'язане з отриманням інформації про канал в реальному часі при масивних передачах в системі МІМО з петлею зворотного зв'язку, технологія NOMA надає альтернативу MU-MIMO без зворотного зв'язку. Оскільки цей механізм не покладається на точну інформацію про канал, він може бути стійкішим до змін мережі, таких як старіння каналу та мобільність користувачів. Тому, механізм без зворотного зв'язку може бути додатково розширений для випадків з кількома базовими станціями, в яких замість збору точної інформації про канал передавання від цільових користувачів та подальшого відправлення цієї інформації на кожен базову станцію для спільного попереднього кодування кожна з партнерських базових станцій може вибрати неортогональний код і спільно передавати потоки даних без обміну інформацією про канал з користувачами або іншими базовими станціями. Це особливо корисно, при недоступності точної інформації або високої собівартості її отримання; забезпечення гнучкого мультиплексування послуг: традиційним підходом ОМА для ефективного обслуговування диверсифікованого трафіку є динамічне планування ресурсів. Цей підхід вимагає додаткових службових даних і може бути недостатньо швидким для відповідності вимогам до мінімальної затримки у деяких сценаріях. Завдяки суперпозиційній природі NOMA невеликі пакети з малою затримкою можуть бути накладені поверх великих пакетів для спільної передачі, тим самим зменшуючи затримку та одночасно скорочуючи накладні витрати [4].

При використанні технології NOMA в висхідному каналі, базові станції передають суму сигналів для кількох користувачів, які займають однакові частотні та часові ресурси. При цьому, базові станції призначають в одну групу NOMA декількох користувачів з різними відношеннями сигнал/шум. Наприклад, якщо взяти двох користувачів, яким заплановані ті самі ресурси і призначені різні сигнатури NOMA, то один користувач знаходиться поряд з базовою станцією, а інший – далеко від неї; передавач виділятиме високу потужність передачі далекому користувачеві та низьку потужність – розташованому поблизу. На приймальній стороні далекий користувач може розглядати сигнали ближнього користувача як шум, потужність якого набагато нижче, ніж потужність його власних сигналів; ближній користувач може відрізнити власні сигнали від сигналів віддаленого користувача після їх детектування та оброблення.

При використанні технології NOMA у висхідному каналі передавання кілька користувачів передають свої сигнали на базову станцію через спільні часові і частотні ресурси [5]. Схема роботи висхідного каналу NOMA складніша, оскільки до того, як кілька сигналів даних від різних користувачів мультиплекуються разом, кожен користувач отримує випадковий канал. Ця особливість унеможливило попереднє проектування складової комбінації з накладенням. Крім того, при проектуванні необхідно враховувати випадковий характер каналів конкретних користувачів. Дослідження висхідного каналу NOMA для 5G NR було розпочато у релізі 3GPP R14. Для передачі даних висхідним каналом було запропоновано безліч різних схем NOMA з підтримкою масового з'єднання і надійних GF-передач. Потім розгляд цього питання було продовжено в релізі R15 як окремий предмет для вивчення [6]. На сьогоднішній день ключові аспекти NOMA у висхідному каналі наступні: уніфікована структура приймача: дослідження NOMA охоплювало схеми передачі для визначення можливості зменшення завади між користувачами, і схеми приймання для коригування решти завад між сусідніми користувачами, для подальшого збільшення їх кількості в мережі доступу. Структура приймача для висхідного каналу на основі технології NOMA та сигналів OFDM зображена на рис. 1. Задіяні у складі передавача специфічні для користувача операції на рівні бітів та/або символів призначені для полегшення декодування накладених даних приймачем із розумною складністю. Методи приймання використовують вдосконалені розраховані на багато користувачів технології прийому для ефективного придушення завад між сусідніми абонентськими каналами з урахуванням витрат на реалізацію і затримки; деякі типові приклади сигнатури NOMA – це множинний доступ із розрідженим кодом (SCMA) [3], багатокористувацький спільний доступ (MUSA) [4], множинний доступ із розподілом ресурсів (RSMA) [5], множинний доступ із розподілом за шаблоном (PDMA) [6], множинний доступ із чергуванням сітки (IGMA) [7] і множинний доступ із поділом-чергуванням (IDMA) [8]. Усі ці схеми можуть бути охарактеризовані різними операціями лише на рівні бітів і символів, які у дослідженні NOMA визначено як сигнатури (signature).

Операції на рівні бітів включають специфічні для користувача обладнання кодування на рівні бітів, скремблювання і перемежування. Операції на рівні символів включають розширення, модуляцію, скремблювання і перемежування на рівні символів, специфічне обладнання користувача.

Важливим типом сигнатури MA є послідовності, що розширюються на рівні символів з властивостями низької взаємної кореляції або низької щільності. В технології NOMA використовуються різні схеми послідовностей, що розширюються на рівні символів, такі як послідовності з рівністю оцінки Уелча, комплексні послідовності з квантованими елементами і грасманові послідовності [1]. Крім того, для підвищення ефективності можуть бути спільно використані розширення та модуляція на рівні символів, наприклад в технології SCMA; реалізація технології NOMA на стороні приймача зумовлена неортогональними властивостями систем NOMA та немінучими завадами між користувачами на стороні приймача систем доступу. В результаті приймач NOMA виконує придушення завад між користувачами. Уніфікована ітераційна схема приймача NOMA [2] складається з двох частин: (1) алгоритм розрахованого на багато користувачів детектування (MUD) і (2) структура ітеративного придушення завад (IC). Алгоритм MUD з низькою складністю та малою затримкою, а також структура придушення завад є дуже важливими

для широкого застосування NOMA, оскільки забезпечують баланс між продуктивністю та витратами на реалізацію.



Рис. 1. Структура приймача висхідного каналу NOMA на основі сигналів OFDM

Дослідження показали, що структура гібридної паралельної інтегральної схеми (PIC) забезпечує найкращий компроміс між продуктивністю та складністю. У гібридній структурі PIC існують ітерації зовнішнього циклу між MUD та каналними декодерами, а програмна та жорстка частини інтегральної схеми працюють паралельно. При цьому, для користувачів з успішно декодованими інформаційними потоками передані сигнали будуть відновлюватись з використанням декодованих інформаційних бітів і виключаються з усіх прийнятих сигналів. Для користувачів з не повністю декодованими інформаційними потоками, зовнішні LLR повертаються в якості вхідних даних в MUD як відправна точка для детектування наступного циклу.

Існує безліч алгоритмів MUD, таких як алгоритм передачі повідомлень (MPA) [3], алгоритм поширення математичного очікування (EPA) [4], лінійна мінімальна середньоквадратична помилка (LMMSE) [5] та елементарна оцінка сигналу (ESE) [6]. Ці алгоритми MUD складаються з наступних елементів: детектор MPA, який може досягти точності, близької до оптимального детектора максимальної правдоподібності, але з набагато меншою складністю, особливо коли розріджений факторний граф. Його вбудована функція «поділай і владарюй» дозволяє реалізувати високий рівень паралелізму; детектор EPA в якому використовується класичний метод наближеного байєсівського виведення [2]. Він проектує справжній апостеріорний розподіл переданих символів в сімейство гаусових розподілів шляхом ітеративного зіставлення середніх і дисперсій з істинним апостеріорним розподілом. В якомусь сенсі EPA є гаусовим наближенням до MPA, але також з урахуванням негаусового розподілу ймовірностей переданих символів. Прямою перевагою цього наближення є лінійна складність щодо розміру модуляції і кількості абонентських пристроїв, при збереженні майже такої ж продуктивності як у MPA в більшості сценаріїв застосування, що представляють інтерес [3]; детектор LMMSE апроксимує апіорний розподіл сигналу як гаусовий, або з середнім значенням та дисперсією, обчисленими з м'яких LLR, що повертаються каналним декодером, або з нульовим середнім значенням та дисперсією, що масштабуються потужністю сигналу, якщо м'який зворотний зв'язок недоступний. LMMSE можна розглядати як окремий випадок EPA, коли кілька антен обробляються спільно без внутрішніх ітерацій між FN і VN; детектор ESE просто апроксимує міжсимвольні завади як гаусовий шум. Детектор ESE повинен покладатися на ітерації зовнішнього циклу (м'який зворотний від каналного декодера) для досягнення прийнятних характеристик детектування. При великій кількості користувачів NOMA кількість ітерацій зовнішнього циклу може бути дуже великою, як і затримка декодування.

Можна спостерігати переваги у збільшенні пропускної здатності системи з точки зору підтримуваної швидкості надходження пакетів (PAR) на заданому рівні збою системи, наприклад, при 1% швидкості відкидання пакетів (PDR). Потім PAR можна використовувати для оцінки підтримуваних з'єднань з урахуванням заданих шаблонів трафіку для кожного користувача.

Таким чином, технологія NOMA є перспективним рішенням для збільшення пропускної спроможності системи за рахунок обслуговування більшої кількості користувачів з тими ж радіоресурсами. Однак у існуючих схем NOMA все ще залишаються проблеми, які потрібно вирішити. По-перше, багато приймачів NOMA використовують ітераційні операції, що робить їх складнішими, ніж приймачі OMA. По-друге, схема NOMA у поєднанні з MIMO все ще вимагає подальшого вивчення щодо підвищення загальної продуктивності. Нарешті, відповідні процедури передачі NOMA, такі як HARQ, вибір сигнатури та адаптація лінії зв'язку, вимагають подальшого вивчення.

Послуги типу URLLC були введені в 5G в основному для підтримки вертикальних додатків, таких як керування рухом в індустрії 4.0 та автономне керування V2X. Завдяки стандартам, визначеним в останніх специфікаціях NR, одночасно можуть бути досягнуті надвисока надійність і низька затримка. Однак через використання ортогональних ресурсів та консервативну адаптацію лінії передавання за кожною обслуговуючою базовою станцією може бути одночасно закріплена лише дуже обмежена кількість користувачів. У мережах 6G такі послуги продовжать розвиток у напрямку розширення списку застосувань з

підвищеними вимогами та більшою кількістю пристроїв, таких як спільні роботи та дистанційне керування. У зв'язку з цим механізм множинного доступу на основі 6G і пов'язані з ним процедури будуть додатково вдосконалені, при цьому очікується, що ключову роль відіграє GF або GB-передача в поєднанні з NOMA [4].

Коли справа доходить до надійності передачі даних на фізичному рівні, її зазвичай можна підвищити за рахунок використання вищих ступенів рознесення для боротьби з невизначеністю, спричиненими явищем завмирання у бездротових каналах. Її також можна покращити за рахунок більш просунутого кодування для боротьби із шумом у каналах. Щодо цих способів підвищення надійності, варто згадати деякі потенційні напрямки для вдосконалення NOMA: NOMA із спільною багаторесурсною схемою для забезпечення покращеного рознесення та допущення збільшеної кількості завад між користувачами, покращуючи характеристики каналів із завмираннями та збільшуючи загальну пропускну здатність; NOMA із спільним каналним кодуванням, яка використовує переваги кодування для придушення перешкод між користувачами. Очікується, що надійність розрахованої на багато користувачів системи доступу можна додатково підвищити, якщо розробляти сигнатури NOMA спільно з каналним кодуванням. Це буде особливо корисно для коротких MA пакетів з вимогами високої надійності.

Множинний доступ недорогих пристроїв буде важливим сценарієм використання мережі 6G. В даний час для підключення недорогих та малопотужних пристроїв у 5G використовуються стандарти NB-IoT та eMTC. При використанні в мережах 6G цільовий термін служби батареї для пристроїв IoT сенсорного типу, як очікується, буде подвоєний (до приблизно 20 років), а кількість пристроїв IoT зросте щонайменше в десять разів, існує постійна потреба в подальшому зниженні енергоспоживання та вартості цих пристроїв. В даний час і в NB-IoT, і в eMTC, як і раніше, потрібна синхронізація часу/частоти. Фактично вона і становить більшу частину енергоспоживання цих пристроїв, у супроводі нечастого та невеликого корисного навантаження.

У мережах 6G постійна синхронізація може бути неприйнятною для деяких сценаріїв використання, особливо для надзвичайно дешевих та малопотужних пристроїв. Однак дешеві компоненти в радіочастотних схемах цих пристроїв можуть викликати проблеми з фазовим шумом в системі 6G, вплив якого збільшуватиметься, якщо пристрої працюють на середніх частотах, а не на низьких. При проектуванні множинного доступу в мережі 6G слід враховувати такі напрями досліджень з прицілом на надзвичайно дешеві та малопотужні пристрої: множинний доступ із стійкістю до зсуву часу/частоти та фазового шуму: асинхронна передача порушить ортогональність між користувачами, навіть якщо застосовується OMA. У цьому випадку будуть доречні сигнатури та приймачі NOMA, стійкі до зсуву часу/частоти та фазового шуму. Крім того, асинхронні сигнали можуть бути розроблені спільно з приймачами NOMA; множинний доступ та сигнали з низьким PAPR базуються на схемах, що включають SCMA на основі DFT та однотональний SCMA [5]. З погляду надзвичайно низьких витрат, множинний доступ треба вивчати разом із новими формами сигналів із низьким PAPR у мережі 6G. Іншими словами, схеми OMA і NOMA повинні бути оптимізовані для підтримки передачі з низьким PAPR.

Надмасивне підключення – це незамінна здатність, необхідна для системи 6G у багатьох застосуваннях, особливо передачі коротких пакетів зі спорадичними моделями трафіку. Для забезпечення надмасивного підключення в межах обмежених радіоресурсів, потрібний безгрантовий доступ за допомогою NOMA. Однак, для реалізації надмасивного підключення спочатку необхідно вирішити наступні проблеми, властиві поточним застосуванням GF-передачі та NOMA: через обмежені загальні радіоресурси та відсутність координації між передачами при масовому підключенні неминуча колізія даних. Для збільшення кількості одночасно активних пристроїв, необхідно провести дослідження щодо покращення схем передачі NOMA та алгоритмів MUD; хоча проблему колізії даних можна зменшити за допомогою передових методів NOMA, колізія пілотних сигналів залишається невиршеною проблемою для множинного безгрантового доступу. Тому подальшого вивчення вимагають схеми розширення пілот-сигналу чи навіть некогерентні схеми без пілот-сигналу. У деяких випадках схеми необхідно розглядати в рамках NOMA, щоб разом вирішувати проблеми колізії пілот-сигналів та проблеми колізії даних, які є двома критичними проблемами для надмасивного підключення; проблему надмасивного підключення у конфігураціях з масивними антенами на стороні базової станції не можна розглядати як просто збільшену версію вихідної проблеми. Вона може бути особливо актуальною, коли кількість антен дуже велика, антени більше не розміщені разом або використовуються нові компоненти, такі як RIS. Деякі особливі властивості каналу у разі застосування надмасивних антен можуть бути застосовані для вирішення проблем колізії як даних, так і пілот-сигналу.

У мережах 6G діапазони міліметрових хвиль і (суб)ТГц повинні використовуватися у поєднанні з масивним MIMO, особливо в застосуваннях з великою пропускну здатністю. При збільшенні кількості антенних елементів та переходом у більш високочастотний діапазон сигнальні промені MIMO стануть надзвичайно вузькими. При цьому, буде складно генерувати кілька дуже вузьких променів, які точно спрямовані для кількох користувачів одночасно, тому що в багатьох сценаріях буде важко отримати точну інформацію про стан каналу. У таких випадках для надійного формування променя можуть бути розроблені покращені схеми NOMA спільно з розрахованим на багато користувачів попереднім кодуванням. Маючи можливість NOMA, MU-MIMO може використовувати модифіковану схему попереднього кодування. Замість формування дуже вузьких і точних променів, націлених для кожного користувача окремо, прекодер MU-MIMO тепер може генерувати ширші промені для роботи із групою користувачів, які додатково мультиплекуються за допомогою NOMA. Збільшення ширини променя робить його більш стійким до змін

параметрів каналу, наприклад, викликаним мобільністю користувача або затримкою вимірювання та зворотного зв'язку. Завади між абонентами всередині групи додатково усуваються приймачем NOMA за допомогою переданих сигнатур NOMA. Аналогічні ідеї можуть бути додатково застосовані при спільній передачі з кількома базовими станціями.

При розробці радіоінтерфейсу в мережах 6G широко застосовуватимуться технології машинного навчання та штучного інтелекту. Методика штучного інтелекту може полегшити розробку багатьох традиційних модулів у каналах зв'язку. Якщо говорити про множинний доступ у мережі 6G, то і передавач, і приймач можуть використовувати методи штучного інтелекту (ШІ).

Передавач із штучним інтелектом базується на результатах розробленої схеми передачі множинного доступу з низькою вартістю, низьким PAPR, малою затримкою, високою надійністю та широкими можливостями підключення. Традиційна методологія проектування на основі класичної моделі може виявитися недостатньою для відповідності результату такій кількості ключових показників. Можливим варіантом вирішення проблеми може бути нейронна мережа, навчена наявними даними. Наприклад, нейронну мережу можна використовувати для розробки сигнатур NOMA спільно з багатьма іншими модулями, такими як форма сигналу та попереднє кодування MIMO.

Приймач зі штучним інтелектом базується на використанні методів штучного інтелекту / машинного навчання, які можуть відіграти роль у полегшенні проектування MUD для NOMA. У мережі 6G з множинним доступом багато традиційних моделей можуть більше не працювати через такі фактори, як асинхронна передача або фазовий шум. Методи штучного інтелекту можуть бути альтернативним рішенням для автоматичного зіставлення сценаріїв. Більше того, за допомогою нейронних мереж можуть бути спільно розроблені різні модулі приймача, наприклад, для виявлення активності користувача, оцінки каналу та MUD.

Висновки

Обґрунтовано необхідність розроблення та впровадження нового множинного доступу до інформаційних послуг із врахуванням сучасних вимог користувачів мережі доступу.

При дослідженні методів множинного доступу із мультиплексуванням ресурсів розглянуто переваги та недоліки ортогонального множинного доступу (OMA) і неортогонального множинного доступу (NOMA). Крім того, виконано порівняльний аналіз схем передачі даних в радіомережі із врахуванням планування ресурсів, зокрема: передачі зі службовою інформацією (GB) та передачі без службової інформації або безгрантової передачі (GF). Запропоновано структуру приймача висхідного каналу NOMA на основі сигналів OFDM. Досліджено особливості забезпечення надмасивного підключення в межах обмежених радіоресурсів на основі безгрантового доступу за допомогою NOMA. При цьому, було розглянуто способи вирішення проблем, що властиві поточним застосуванням GF-передачі та NOMA при реалізації надмасивного підключення до мережі доступу на основі технології 6G.

Розглянуто перспективи впровадження передавача із штучним інтелектом на основі схеми передачі множинного доступу з низькою вартістю, низьким PAPR, малою затримкою, високою надійністю та широкими можливостями підключення. А також розглянуто особливості проектування приймача зі штучним інтелектом при застосуванні методів штучного інтелекту / машинного навчання, які можуть відіграти роль у полегшенні проектування MUD для NOMA.

Література

9. Y. Liu, Z. Qin, and Z. Ding, Non-orthogonal multiple access for massive connectivity. Springer, 2020.
10. X. Meng, L. Zhang, C. Wang, L. Wang, Y. Wu, Y. Chen, and W. Wang, Advanced NOMA receivers from a unified variational inference perspective, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020.
11. R. Calderbank and A. Thompson, Chirrup: A practical algorithm for unsourced multiple access, Information and Inference: A Journal of the IMA, vol. 9, no. 4, pp. 875–897, Dec. 2020.
12. A. Decurninge, I. Land, and M. Guillaud, Tensor-based modulation for unsourced massive random access, IEEE Wireless Communications Letters, 2021.
13. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Челюян В.А. Спектральний метод оцінювання джитеру в телекомунікаційних системах. - Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2010, № 2, С. 109-114.
14. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Кичак В.М. Методи та засоби підвищення ефективності оцінювання фазового дрижання сигналів у телекомунікаційних системах: Монографія. - Вінниця: ВНТУ, 2015. - 140 с.
15. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Стальченко О.В. Пристрій аналого-цифрового перетворення височастотних сигналів. - Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013, № 2. – С.82-85.
16. M. Vaezi, Z. Ding, and H. V. Poor, Multiple access techniques for 5G wireless networks and beyond. Springer, 2019.

References

1. Y. Liu, Z. Qin, and Z. Ding, Non-orthogonal multiple access for massive connectivity. Springer, 2020.

2. X. Meng, L. Zhang, C.Wang, L.Wang, Y.Wu, Y. Chen, and W.Wang. Advanced NOMA receivers from a unified variational inference perspective, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020.
3. R. Calderbank and A. Thompson, Chirrup: A practical algorithm for unsourced multiple access, *Information and Inference: A Journal of the IMA*, vol. 9, no. 4, pp. 875–897, Dec. 2020.
4. A. Decurninge, I. Land, and M. Guillaud, Tensor-based modulation for unsourced massive random access, *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021.
5. Bortnyk G.G., Vasylykivskiy M.V., Cheloyan V.A. Spektral'nyy metod otsinyuvannya dzhyteru v telekomunikatsiynyykh systemakh. - *Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu*, 2010, № 2, S. 109-114.
6. Bortnyk G.G., Vasylykivskiy M.V., Kychak V.M. Metody ta zasoby pidvyshchennya efektyvnosti otsinyuvannya fazovoho dryzhannya syhnaliv u telekomunikatsiynyykh systemakh: Monohrafiya. - Vinnytsya: VNTU, 2015. - 140 s.
7. Bortnyk G.G., Vasylykivskiy M.V., Stalchenko O.V. Device for analog-digital conversion of high-frequency signals. - *Measuring and computing equipment in technological processes.*—2013, No. 2.— P.82-85.
8. M. Vaezi, Z. Ding, and H. V. Poor, *Multiple access techniques for 5G wireless networks and beyond*. Springer, 2019.