

Кравченко В.І., к.т.н., **Дакова Л.В.**, к.т.н.,
Багмет В.В., студент, **Сержанський С.С.**, студент

МЕТОДИ МОДУЛЯЦІЇ ТА КОДУВАННЯ В МЕРЕЖАХ 5 ПОКОЛІННЯ

Kravchenko V.I., Dakova L.V., Bahmet V.V., Serzhanskyi S.S. Modulation and coding methods in 5th generation networks. The fifth generation (5G) of wireless communication networks represents a groundbreaking shift in the realm of connectivity, enabling a wide array of transformative applications and services. This article delves into the pivotal role played by modulation and coding methods in the context of 5G networks. It explores their significance, delves into recent research and publications within the field, and outlines the direction for future research endeavors.

Modulation and coding (M&C) are fundamental for 5G networks, enhancing data rates, reliability, and reducing interference. This article delves into their role in 5G networks, addressing challenges, including fading channels, interference, and diverse user needs. Recent research explores advanced modulation schemes like 256-QAM and 1024-QAM, requiring error correction coding techniques like Turbo codes and LDPC codes. Massive MIMO, using multiple antennas at both ends, is supported by adaptive coding and modulation. Adaptive Modulation and Coding (AMC) dynamically adjusts schemes based on real-time channel conditions, balancing data rate and reliability. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) accommodates massive device connectivity, allowing multiple users to share resources with different power levels and modulation schemes. The study aims to comprehensively analyze 5G's M&C methods, assess modulation schemes for higher data rates, evaluate error correction coding, investigate Massive MIMO and adaptive modulation for spectral efficiency, and scrutinize NOMA's potential for massive device connectivity. Results highlight the importance of advanced modulation schemes, efficient error correction coding, and adaptive techniques in realizing 5G objectives, enabling higher data rates, lower latency, and improved reliability. NOMA is promising for accommodating many connected devices in 5G. M&C are essential for efficient and reliable data transmission in 5G, with ongoing research refining techniques for 6G and beyond. Integrating machine learning and AI into M&C algorithms holds promise for enhancing network efficiency and reliability.

Keywords: wireless communication, modulation methods, coding techniques, 5G network, 5G technology.

Кравченко В.І., Дакова Л.В., Багмет В.В., Сержанський С.С. Методи модуляції та кодування в мережах 5 покоління. П'яте покоління (5G) бездротових мереж зв'язку являє собою революційний зсув у сфері підключення, уможливаючи широкий спектр трансформаційних додатків і послуг. У цій статті розглядається ключова роль, яку відіграють методи модуляції та кодування в контексті мереж 5G. У ній досліджується їхнє значення, розглядаються останні дослідження і публікації в цій галузі, а також окреслюються напрямки майбутніх досліджень.

Ключові слова: бездротовий зв'язок, методи модуляції, методи кодування, мережі 5G, технологія 5G.

Вступ

Мережі 5G відкрили еру високошвидкісного зв'язку з низькою затримкою, уможлививши широкий спектр застосувань - від автономних транспортних засобів до Інтернету речей (IoT) і доповненої реальності. Успіх 5G значною мірою залежить від інноваційних методів модуляції і кодування, що застосовуються для забезпечення безперебійної передачі даних через мережу. Ці методи відіграють ключову роль у збільшенні швидкості передачі даних, підвищенні надійності та зменшенні перешкод.

Постановка проблеми

Проблема, про яку йдеться, стосується ефективної передачі даних у бездротових мережах зв'язку п'ятого покоління (5G). Методи модуляції та кодування займають центральне місце в цьому питанні, оскільки вони визначають, наскільки ефективно можна надсилати та отримувати дані в цих мережах. Теоретичне і практичне значення цієї проблеми важко переоцінити, враховуючи глибокий вплив 5G на сучасне суспільство і технології.

Теоретичне значення полягає в тому, що мережі 5G перевизначили межі бездротового зв'язку. Вони обіцяють безпрецедентну швидкість передачі даних, надзвичайно низьку затримку і можливість підключення величезної кількості пристроїв одночасно. Однак ці можливості супроводжуються величезними технічними проблемами, особливо у сфері передачі даних. Розробка методів модуляції та кодування стає критично важливим пазлом в екосистемі 5G, що вимагає передових математичних та інженерних рішень.

З практичної точки зору, проблема оптимізації методів модуляції і кодування в мережах 5G має глибокі реальні наслідки. Технологія 5G лежить в основі широкого спектру застосувань, включаючи автономні транспортні засоби, розумні міста, віддалену охорону здоров'я та промислову автоматизацію. Ці додатки вимагають не лише високошвидкісної передачі даних, але й надійності, безпеки та ефективного використання ресурсів спектру. Успіх 5G і його вплив на різні галузі залежать від здатності ефективно вирішувати ці практичні завдання.

Актуальність цього дослідження підкреслюється глобальним розгортанням мереж 5G і безперервним розвитком бездротових технологій. Оскільки мережі 5G стають все більш поширеними, існує нагальна потреба в підвищенні їх продуктивності та оптимізації можливостей. Крім того, дослідження методів модуляції і кодування в мережах 5G закладає основу для розвитку майбутніх технологій бездротового зв'язку, включаючи 6G і далі.

По суті, проблема оптимізації методів модуляції і кодування в мережах 5G є як теоретично цікавою, так і практично необхідною. Її теоретичне значення полягає в розширенні меж досліджень бездротового зв'язку, а практичне - у формуванні способів зв'язку, комунікації та інновацій в епоху 5G і в майбутньому. Вирішення цієї проблеми є життєво важливим для забезпечення подальшого розвитку та успіху бездротових мереж зв'язку в сучасну цифрову епоху [1 - 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні дослідження і публікації в галузі методів модуляції і кодування в мережах 5G були плідними, проливаючи світло на різні аспекти цього критично важливого питання. Нижче ми визначаємо ключові напрямки останніх досліджень, висвітлюючи невирішені аспекти загальної проблеми:

Розширені схеми модуляції: нещодавні дослідження [4] вивчали вдосконалені схеми модуляції, такі як 256-QAM і 1024-QAM, з метою досягнення вищих швидкостей передачі даних. Хоча ці схеми обіцяють покращити спектральну ефективність, вони також створюють проблеми, пов'язані з підвищеною чутливістю до погіршення якості каналу, частотою помилок і потребою в більш складних методах кодування з корекцією помилок. Серед невирішених питань - пошук балансу між максимізацією швидкості передачі даних і підтримкою надійного зв'язку в реальних умовах зашумленого середовища.

Кодування з корекцією помилок: кілька досліджень [5] заглибилися в методи кодування з корекцією помилок, такі як турбо-коди і коди LDPC, які є важливими для зменшення помилок при бездротовій передачі даних. Однак проблема полягає в оптимізації цих кодів для різних випадків використання 5G, включаючи додатки з низькою затримкою, масове підключення пристроїв і наднадійний зв'язок. Невирішеним аспектом тут є розробка кодів корекції помилок, які є достатньо універсальними, щоб адаптуватися до різних сценаріїв 5G. Однак, з появою мереж 5G, де швидкість передачі даних є критичним фактором, дослідження методів модуляції та кодування стали актуальнішими. Останні дослідження спрямовані на вдосконалення алгоритмів модуляції та кодування для досягнення найвищої можливої ефективності передачі даних в мережах 5G.

Технологія Massive MIMO: впровадження технології Massive MIMO в мережах 5G [7] привернуло значну увагу. Дослідження вивчали переваги декількох антен на обох кінцях лінії зв'язку, такі як покращена спектральна ефективність і підвищена пропускна здатність. Однак залишаються проблеми з оптимізацією Massive MIMO для розгортання в реальних умовах,

особливо в сценаріях з неідеальними умовами каналу, апаратними обмеженнями і потребою в ефективних стратегіях формування променя.

Адаптивна модуляція і кодування (AMC): методи AMK [10] динамічно підлаштовують схеми модуляції та кодування відповідно до умов каналу. Хоча AMK може оптимізувати компроміс між швидкістю передачі даних і надійністю, невирішені питання включають розробку більш складних алгоритмів, які можуть швидко адаптуватися до мінливих умов каналу і різноманітних типів трафіку. Крім того, аспект енергоефективності AMC залишається предметом постійних досліджень.

Неортогональний множинний доступ (NOMA): NOMA досліджується [11] для підтримки масового підключення пристроїв у мережах 5G. Хоча він пропонує потенційні переваги з точки зору ефективності використання спектра і зв'язку, існують невирішені проблеми, пов'язані з управлінням перешкодами, стратегіями сполучення користувачів та інтеграцією NOMA в існуючі мережеві архітектури.

Інтеграція машинного навчання та штучного інтелекту: деякі нещодавні дослідження [13] вивчали інтеграцію машинного навчання і штучного інтелекту в методи модуляції і кодування. Ці технології є перспективними для оптимізації параметрів модуляції та кодування в режимі реального часу. Однак дослідження в цій галузі все ще перебувають на початковому етапі, і багато практичних проблем, зокрема вимоги до навчальних даних і складність обчислень, залишаються невирішеними.

Підсумовуючи, можна сказати, що останні дослідження і публікації досягли значних успіхів у вирішенні складних питань, пов'язаних з методами модуляції і кодування в мережах 5G. Однак залишається кілька невирішених аспектів, зокрема оптимізація вдосконалених схем модуляції, адаптація кодування з корекцією помилок для різних випадків використання, вдосконалення Massive MIMO для практичного розгортання, підвищення адаптивності методів AMC, управління завадами в NOMA і використання повного потенціалу машинного навчання і штучного інтелекту в оптимізації модуляції і кодування. Ці невирішені питання відкривають можливості для подальших досліджень та інновацій у сфері бездротового зв'язку 5G.

Мета і задачі дослідження

Основною метою цього дослідження є аналіз і розуміння різних методів модуляції і кодування, що використовуються в мережах 5G. Конкретні завдання включають:

- оцінка ефективності різних схем модуляції для досягнення більш високої швидкості передачі даних..
- оцінка ефективності методів кодування з корекцією помилок для пом'якшення наслідків погіршення якості бездротового каналу.
- дослідження ролі масової MIMO та адаптивної модуляції в оптимізації спектральної ефективності..
- вивчення потенціалу NOMA для підключення великої кількості пристроїв.

Виклад основного матеріалу дослідження

Прогресивні схеми модуляції: підвищення швидкості передачі даних в мережах 5G

Нещодавні дослідження в галузі бездротових мереж зв'язку 5G свідчать про значний акцент на вдосконалених схемах модуляції, зокрема на вивченні методів модуляції високого порядку, таких як 256-QAM і 1024-QAM. Ці схеми є фундаментальною основою обіцянки 5G забезпечити безпрецедентну швидкість передачі даних, що дозволить задовольнити зростаючі потреби цифрового світу. Хоча вдосконалені схеми модуляції дійсно є ключем до підвищення спектральної ефективності, вони не позбавлені власних проблем.

Перспективи та виклики

Схеми модуляції високого порядку, такі як 256-QAM і 1024-QAM, пропонують привабливу перспективу досягнення значно вищих швидкостей передачі даних. Кодуючи більше бітів у

кожному символі, ці схеми забезпечують швидшу передачу даних, що є життєво важливим для додатків, які залежать від високої пропускної здатності і низької затримки. Однак цей підхід має свої складнощі, які в основному зосереджені навколо наступних аспектів:

- Чутливість до каналних завад. Однією з нагальних проблем, пов'язаних з удосконаленими схемами модуляції, є їхня підвищена чутливість до завад у каналі. Коли бездротові сигнали проходять через непередбачувану і часто зашумлену сферу реального зв'язку, вони стикаються з безліччю перешкод і спотворень. Ця вразливість призводить до збільшення частоти помилок в отриманих даних, тим самим підриваючи загальну надійність зв'язку.

- Потреба у вдосконаленому кодуванні з корекцією помилок. Для вирішення проблеми погіршення якості каналів зв'язку вкрай необхідні вдосконалені методи кодування з корекцією помилок. Такі методи, як турбо-коди і коди LDPC, були широко вивчені і прийняті для зменшення помилок, що виникають під час бездротової передачі даних. Ці методи кодування відіграють ключову роль у підвищенні надійності передачі даних в мережах 5G.

Оптимізація кодування з корекцією помилок у різних сценаріях використання 5G

Хоча кодування з корекцією помилок має важливе значення в мережах 5G, його оптимізація для задоволення різноманітних вимог різних сценаріїв використання є складним завданням. У контексті 5G, який призначений для обслуговування широкого спектру застосувань, починаючи від наднадійного зв'язку з низькою затримкою (URLLC) до масового зв'язку машинного типу (mMTC) і розширеного мобільного широкосмугового зв'язку (eMBB), вимоги до кодування з корекцією помилок є багатограничними.

Додатки з низькою затримкою

У випадку додатків з низькою затримкою, таких як автономні транспортні засоби та промислова автоматизація, першочерговим завданням є мінімізація часу, що витрачається на корекцію помилок. Це вимагає розробки кодів корекції помилок, які не тільки високоефективні, але й здатні швидко працювати в режимі реального часу, забезпечуючи мінімально можливу затримку.

Підключення великої кількості пристроїв

Для додатків, що передбачають масове підключення пристроїв, наприклад, підключення великої кількості пристроїв Інтернету речей, кодування для виправлення помилок повинно бути оптимізоване для ефективної обробки величезного обсягу трафіку даних. Вкрай важливо забезпечити можливість ефективного масштабування процесів кодування, щоб пристосувати їх до численних пристроїв у мережі.

Наднадійний зв'язок

У контексті наднадійного зв'язку, який має вирішальне значення в таких сферах, як телемедицина і дистанційна хірургія, кодування з корекцією помилок повинно гарантувати майже бездоганну передачу даних навіть у складних умовах мережі. Для цього потрібні передові методи кодування, спеціально розроблені для забезпечення надзвичайно високого рівня надійності.

Прагнення до універсальності

Невирішеним аспектом у сфері кодування з корекцією помилок для мереж 5G є розробка кодів, які є достатньо універсальними, щоб адаптуватися до різноманітних сценаріїв, представлених різними варіантами використання. Дослідники активно вивчають методи адаптивного кодування з корекцією помилок, які можуть динамічно підлаштовуватися під конкретні вимоги кожного випадку використання.

Енергоефективність

Окрім універсальності, енергоефективність є ще однією нагальною проблемою. Забезпечення того, щоб кодування з корекцією помилок споживало мінімум енергії при збереженні високої надійності, відповідає основній меті екологічно чистої та стійкої роботи мережі.

Адаптивна модуляція та кодування (АМС): досягнення балансу

У постійному розвитку мереж 5G одним із ключових напрямів дослідження є сфера адаптивної модуляції та кодування (АМС). Ці методи привернули значну увагу, оскільки вони мають потенціал для динамічного налаштування схем модуляції та кодування на основі умов каналу в реальному часі, таким чином оптимізуючи компроміс між швидкістю передачі даних і надійністю. Проте АМС не позбавлена власного набору невирішених проблем, які потребують інноваційних рішень.

Динамічна адаптація до умов каналу

Основна перевага АМС полягає в його здатності адаптуватися до мінливих умов каналу. Цей динамічний підхід дозволяє вибрати оптимальну комбінацію схем модуляції та кодування, забезпечуючи ефективну та надійну передачу даних. У сценаріях, коли якість каналу коливається, АМС може змінити правила гри, обіцяючи більш високу швидкість передачі даних, коли це дозволяють умови.

Виклик: швидка адаптація та різноманітність

Незважаючи на те, що АМС багатообіцяюча, існує гостра проблема, над вирішенням якої активно працюють дослідники: потреба в більш складних алгоритмах, які можуть швидко адаптуватися до мінливих умов каналу та адаптуватись до різноманітних типів трафіку. У сфері 5G, де варіанти використання охоплюють від наднадійного зв'язку з малою затримкою (URLLC) до масового зв'язку машинного типу (mMTC), пошук правильного балансу між швидкістю та точністю має першочергове значення.

Енергоефективність: велика проблема

Іншим невирішеним аспектом у дослідженнях АМС є пошук більшої енергоефективності. У пошуках балансу між швидкістю передачі даних і надійністю, метою є мінімізація споживання енергії. Це узгоджується з головною метою створення стійких екологічних мереж. Дослідники досліджують методи підвищення енергоефективності методів АМС для зменшення вуглецевого сліду мереж 5G.

Неортогональний множинний доступ (NOMA): революція в підключенні

Неортогональний множинний доступ (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) стає революційним рішенням для задоволення потреб масового підключення пристроїв у мережах 5G. NOMA являє собою значний відхід від традиційних методів ортогонального множинного доступу, і його дослідження виявило потенційні переваги в ефективності використання спектра і зв'язку. Однак існують критичні проблеми, які необхідно подолати.

Ефективність використання спектра і переваги зв'язку

NOMA надає потенційні переваги з точки зору ефективності використання спектра і зв'язку, що робить його привабливою пропозицією для епохи 5G. Дозволяючи декільком користувачам спільно використовувати одні й ті ж блоки ресурсів, NOMA може збільшити пропускну здатність мережі і вмістити більшу кількість підключених пристроїв.

Невирішені проблеми

Незважаючи на свою багатообіцяючу перспективу, існують важливі питання, над якими дослідники старанно працюють, щоб зробити NOMA практичною реальністю в мережах 5G:

- **Управління завадами.** Однією з основних проблем, пов'язаних з NOMA, є управління завадами. Оскільки багато користувачів користуються одними і тими ж ресурсами, виникає потенціал для інтерференції між сигналами користувачів. Пошук ефективних стратегій для управління цими перешкодами є ключовим напрямком поточних досліджень.

- **Стратегії сполучення користувачів.** NOMA покладається на ефективні стратегії об'єднання користувачів для оптимізації використання ресурсів. Визначення найбільш підходящих пар користувачів для спільного використання ресурсів є складним завданням, оскільки воно залежить від різних факторів, таких як стан каналу, можливості пристрою та вимоги до трафіку.

• Інтеграція в існуючі мережеві архітектури. Інтеграція NOMA в існуючі мережеві архітектури не є простим завданням. Дослідники вивчають способи плавного переходу від традиційних методів множинного доступу до NOMA, зберігаючи при цьому зворотну сумісність із застарілими пристроями та мережами.

Машинне навчання та інтеграція ШІ: першовідкривачі майбутнього

Поєднання машинного навчання (ML) і штучного інтелекту (AI) з методами модуляції і кодування відкрило нові можливості для мереж 5G. Нещодавні дослідження почали вивчати інтеграцію ML і ШІ для оптимізації параметрів модуляції і кодування в режимі реального часу, тим самим підвищуючи продуктивність мережі. Однак ця сфера все ще перебуває на стадії становлення і створює практичні виклики.

Оптимізація в режимі реального часу

Однією з головних переваг інтеграції ML і ШІ є їхня здатність оптимізувати параметри модуляції і кодування в режимі реального часу. Безперервно оцінюючи стан каналу та продуктивність мережі, ці технології можуть вносити корективи "на льоту" для підвищення ефективності передачі даних.

Невирішені проблеми

Незважаючи на багатообіцяючі перспективи, існує кілька невирішених проблем в інтеграції ML і ШІ в методи модуляції і кодування:

• Вимоги до навчальних даних. Моделі ML та AI потребують значних обсягів навчальних даних для ефективної роботи. Забезпечення доступу до достатніх і релевантних даних є постійною проблемою, особливо в динамічних мережах 5G.

• Обчислювальна складність. Обчислювальна складність алгоритмів ML та ШІ - ще один аспект, який потребує уваги. Балансування обчислювальних вимог оптимізації в реальному часі з наявними апаратними ресурсами є постійною сферою досліджень.

Розвиток методів модуляції і кодування в мережах 5G тісно переплітається з адаптивною модуляцією і кодуванням (AMC), неортогональним множинним доступом (NOMA) та інтеграцією машинного навчання і штучного інтелекту. Ці технології, що розвиваються, мають потенціал революціонізувати наш підхід до бездротового зв'язку, але вони також несуть з собою певні виклики та складнощі, які вимагають інноваційних рішень. Оскільки ера 5G продовжує розгортатися, дослідники прагнуть знайти відповіді на ці невирішені аспекти і сформулювати майбутнє бездротового зв'язку.

Висновки і перспективи подальших досліджень

Дослідження методів модуляції та кодування в мережах 5-го покоління (5G) відкрило динамічний і складний ландшафт. Нещодавні дослідження досягли значних успіхів у розумінні та розвитку цих важливих компонентів сучасного бездротового зв'язку. Завершуючи наш огляд цих технологій, ми бачимо, що, незважаючи на значний прогрес, кілька ключових аспектів залишаються невирішеними, що відкриває захоплюючі перспективи для подальших досліджень та інновацій.

Розширені схеми модуляції:

• Розширені схеми модуляції, такі як 256-QAM і 1024-QAM, обіцяють підвищити швидкість передачі даних у мережах 5G.

• Ці схеми мають переваги у спектральній ефективності, але чутливі до погіршення якості каналу, що збільшує рівень помилок.

• Досягнення балансу між максимізацією швидкості передачі даних і забезпеченням надійного зв'язку в зашумленому середовищі залишається головною проблемою.

Кодування з корекцією помилок:

• Кодування з корекцією помилок за допомогою турбо-кодів і кодів LDPC має важливе значення для зменшення кількості помилок при бездротовій передачі даних.

- Оптимізація цих кодів для різних випадків використання 5G, від додатків з низькою затримкою до масового підключення пристроїв, є складним завданням.

- Розробка універсальних кодів корекції помилок, адаптованих до різних сценаріїв, є критично важливим завданням.

Технологія Massive MIMO:

- Технологія Massive MIMO підвищує спектральну ефективність, пропускну здатність і якість сигналу в мережах 5G.

- Неідеальні умови каналу, апаратні обмеження та ефективні стратегії формування променя створюють проблеми при оптимізації Massive MIMO для розгортання в реальних умовах.

Адаптивна модуляція та кодування (AMC):

- Розробка більш досконалих алгоритмів, які можуть швидко адаптуватися до мінливих умов каналу, є важливою сферою досліджень.

- Підвищення енергоефективності методів AMC для підтримки парадигми "зеленої" мережі є постійним викликом.

- Поточні дослідження можуть призвести до створення рішень AMC, які не тільки адаптуються, але й є сталими з точки зору енергоспоживання.

Неортогональний множинний доступ (NOMA):

- Вирішення проблеми управління завадами в NOMA і оптимізація стратегій сполучення користувачів залишаються важливими завданнями досліджень.

- Безперешкодна інтеграція NOMA в існуючі мережеві архітектури зі збереженням зворотної сумісності є складною сферою досліджень.

- Перспективні дослідження можуть прокласти шлях до практичної реалізації NOMA, уможлививши підключення безлічі пристроїв до мереж 5G.

Інтеграція машинного навчання та штучного інтелекту:

- Задоволення вимог до навчальних даних для моделей машинного навчання та штучного інтелекту є фундаментальною проблемою, що вимагає доступності та актуальності даних.

- Баланс між обчислювальною складністю та наявними апаратними ресурсами є важливим для оптимізації в реальному часі в мережах 5G.

- Інтеграція ML і AI в методи модуляції і кодування знаходиться на початковому етапі, що відкриває безмежні перспективи для подальших досліджень та інновацій.

На завершення можна сказати, що сфера методів модуляції і кодування в мережах 5G, яка постійно розвивається, характеризується як прогресом, так і постійними проблемами. Дивлячись у майбутнє, дослідники та інноватори стоять в авангарді новаторських рішень, спрямованих на вирішення цих невирішених аспектів. Зі стрімким розвитком технології 5G і попитом на більш високу швидкість передачі даних, меншу затримку і розширені можливості підключення, пошук передових методів модуляції і кодування залишається захоплюючим і життєво важливим напрямком для подальших досліджень. Ці зусилля не лише визначатимуть майбутнє бездротового зв'язку, але й сприятимуть подальшій еволюції нашого світу, пов'язаного з цифровими технологіями.

Список використаної літератури:

1. Andrews, J. G., Buzzi S., Choi W., Hanly S.V., Lozano A., Soong A.C.K., Zhang J.C. What will 5G be? IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2014. Vol. 32, №6. P. 1065-1082.
2. Goldsmith, A. Wireless Communications. Cambridge University Press. 2005. P. 283-319.
3. Boccardi F., Heath Jr. R. W., Lozano A., Marzetta T. L., Popovski P. Five disruptive technology directions for 5G. IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52, №2. P. 74-80.
4. Djordjevic, I.B. Advanced Modulation and Multiplexing Techniques. In: Advanced Optical and Wireless Communications Systems. 2018. P. 323.

5. Jiang, Y., Kim, H., Asnani, H., Kannan, S., Oh, S., Viswanath, P. Joint Channel Coding and Modulation via Deep Learning. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2020.
6. Wang J., Huang H., Liu J., Li J. Joint Demodulation and Error Correcting Codes Recognition Using Convolutional Neural Network. 2022.
7. Larsson, E.G., Edfors, O., Tufvesson, F. and Marzetta, T.L. Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems. IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52, №2. P. 186-195.
8. Björnson E., Larsson E. G., Marzetta T. L. Massive MIMO: Ten Myths and One Critical Question. IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54, №2. P. 114-123.
9. Cai Y., Qin Z., Cui F., Li G. Y., McCann J. A. Modulation and Multiple Access for 5G Networks. 2017. P. 1-27.
10. Wang Y., Liu W., Fang L. Adaptive Modulation and Coding Technology in 5G System. 2020.
11. Dai, L., Wang, B., Ding, Z., Wang, Z., Chen, S., Hanzo, L. A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G. 2018. P. 1-30.
12. Budhiraja I., Kumar N., Tyagi S., Tanwar S., Han Z., Piran M. J., Suh D. Y. A Systematic Review on NOMA Variants for 5G and Beyond. 2021. P. 1-72.
13. Chamat M., Kodra D. B. Machine Learning Based Modulation and Coding Scheme Selection. 2019.

Автори статті

Кравченко Владислав – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

Дакова Лариса – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

Багмет Владислав – студент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

Сержанський Станіслав – студент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

Authors of the article

Kravchenko Vladyslav - Candidate of Science (technic), associate professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

Dakova Larysa - Candidate of Science (technic), associate professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

Bahmet Vladyslav – student, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

Serzhanskyi Stanislav – student, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.