

ОПТИМІЗАЦІЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ У МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

Стрімкий розвиток бездротових технологій і зростання вимог до швидкості, надійності та енерго-ефективності передавання даних зумовлюють необхідність підвищення спектральної ефективності в мережах шостого покоління (6G). У роботі запропоновано підхід до оптимізації спектрального використання частотного ресурсу шляхом інтеграції технологій beam-space MIMO, неортогонального мультимедіуму (NOMA), повнодуплексних D2D-комунікацій та Layered Division Multiplexing (LDM).

Проведено аналітичне й числове моделювання показників ймовірності відмови (outage probability) та ергодичної ємності (ergodic capacity) для ширококомовної mmWave MIMO-NOMA системи з D2D-підтримкою. Результати дослідження показали, що запропонована архітектура забезпечує суттєве підвищення спектральної ефективності, зниження ймовірності відмови користувачів і збільшення пропускну здатності порівняно з традиційними схемами TDM та LDM без D2D-зв'язку.

Оптимізація потужності повнодуплексного передавання дозволяє мінімізувати власні завади, а збільшення кількості антен базової станції сприяє покращенню якості обслуговування користувачів. Отримані результати можуть бути використані під час проектування високопродуктивних ширококомовних систем 5G/6G, орієнтованих на підтримку мультимедійних і критично важливих сервісів у майбутніх телекомунікаційних мережах.

Ключові слова: 6G, спектральна ефективність, mmWave, MIMO, NOMA, LDM, D2D-комунікації, Full-Duplex, beamforming, outage probability, ergodic capacity.

Abstract

The rapid development of wireless technologies and the growing demand for high data rate, reliability, and energy efficiency necessitate improving spectral efficiency in sixth-generation (6G) communication networks. This paper proposes an approach to optimizing spectral resource utilization through the integration of beam-space MIMO, non-orthogonal multiple access (NOMA), full-duplex D2D communications, and Layered Division Multiplexing (LDM) technologies.

Analytical and numerical modeling of outage probability and ergodic capacity has been performed for a broadcast mmWave MIMO-NOMA system with D2D support. The results show that the proposed architecture provides a significant improvement in spectral efficiency, reduces user outage probability, and increases system throughput compared to traditional TDM and LDM without D2D configurations.

Optimization of full-duplex transmission power enables minimizing self-interference, while increasing the number of base station antennas improves user service quality. The obtained results can be applied in the design of high-performance 5G/6G broadcast systems aimed at supporting multimedia and mission-critical services in future telecommunication networks.

Keywords: 6G, spectral efficiency, mmWave, MIMO, NOMA, LDM, D2D communications, Full-Duplex, beamforming, outage probability, ergodic capacity.

Вступ

Стрімкий розвиток бездротових технологій та зростання вимог до швидкості, надійності й енергоефективності передавання даних визначають потребу у підвищенні спектральної ефективності майбутніх мереж зв'язку шостого покоління (6G). Основними напрямками розвитку 6G є забезпечення надвисокої пропускну здатності, мінімальної затримки, підтримка масового підключення пристроїв і інтеграція інтелектуальних методів керування ресурсами [1].

Одним із ключових завдань є поєднання ширококомовного та одноадресного трафіку в єдиній

архітектурі, що дає змогу підвищити ефективність використання частотного спектра. Перспективним підходом у цьому напрямі є застосування Layered Division Multiplexing (LDM), неортогонального мультимультимедіа (NOMA), а також повнодуплексних D2D-комунікацій, які дозволяють одночасну передачу й приймання сигналів у межах одного спектрального ресурсу [2].

Використання mmWave-діапазону, масивних антенних систем (Massive MIMO) та технологій beamforming відкриває додаткові можливості для підвищення пропускної здатності та зниження рівня перешкод, проте потребує ефективних методів розподілу потужності й оптимізації каналів [3].

Метою дослідження є розроблення та аналіз просторово-променевої MIMO-NOMA архітектури з підтримкою повнодуплексних D2D-комунікацій, здатної підвищити спектральну ефективність і зменшити ймовірність відмови користувачів у mmWave-мережах. Отримані результати можуть бути використані під час проектування високопродуктивних ширококомовних систем 5G/6G і створення енергоефективних рішень для мультимедійних та критично важливих сервісів.

Результати дослідження

У роботі проведено аналітичне та числове моделювання ефективності просторово-променевої mmWave MIMO-NOMA системи з підтримкою повнодуплексного D2D-зв'язку та LDM-мультиплексування, орієнтованої на підвищення спектральної ефективності мереж шостого покоління.

Розроблена модель враховує формування променів (beam-space MIMO), неортогональний мультимультимедіа (NOMA), двошарову структуру LDM (Layered Division Multiplexing) та повнодуплексний режим D2D-комунікацій, що дозволяє об'єднати ширококомовне та одноадресне передавання в межах одного спектрального ресурсу [4].

Проведено аналітичне виведення виразів для ймовірності відмови (outage probability) та ергодичної пропускної здатності (ergodic capacity) із використанням перетворення Лапласа. Результати числового моделювання методом Монте-Карло підтвердили високу точність аналітичних рішень [5].

Встановлено такі закономірності:

Потужність базової станції істотно впливає на надійність зв'язку: зі зростанням потужності передавання ймовірність відмови зменшується, причому схема LDM перевищує TDM за спектральною ефективністю. У середньому ймовірність відмови дальнього користувача знижується на ≈ 30 дБ при застосуванні D2D-комунікацій [6].

Потужність ближнього користувача визначає баланс між власними завадами та підсиленням каналу ретрансляції. Оптимальний рівень потужності забезпечує максимальну ергодичну ємність, тоді як надмірне підсилення призводить до зростання власних завад і зниження продуктивності [1, 2].

Кількість антен базової станції прямо впливає на пропускну здатність: із розширенням антенних решіток ергодична ємність зростає логарифмічно, а ймовірність відмови зменшується. При 64 антенах ефективність LDM перевищує TDM приблизно на 10 дБ, а ємність зростає на $\approx 0,2$ біт/с/Гц [3, 4].

Коефіцієнт розподілу потужності між шарами LDM впливає переважно на ближнього користувача: при малих значеннях коефіцієнта спостерігається підвищення ймовірності відмови, тоді як дальній користувач завдяки D2D-ретрансляції зберігає стабільну якість обслуговування.

Порівняльний аналіз показав, що запропонована повнодуплексна mmWave MIMO-NOMA LDM-система демонструє вищу спектральну ефективність, меншу ймовірність відмови та вищу ергодичну пропускну здатність, ніж традиційні схеми TDM та LDM без D2D-зв'язку [5, 6].

Таким чином, інтеграція технологій beam-space MIMO, NOMA, Full-Duplex D2D та LDM-мультиплексування забезпечує новий підхід до оптимізації спектральної ефективності в мережах шостого покоління. Запропонована архітектура може бути використана під час проектування високопродуктивних ширококомовних систем 5G/6G, що підтримують мультимедійні сервіси з низькою затримкою та високою надійністю передавання.

Висновки

У роботі проведено аналіз продуктивності широкомовної mmWave MIMO-NOMA системи з підтримкою повнодуплексних D2D-комунікацій з метою підвищення спектральної ефективності мереж шостого покоління. На основі аналітичного та числового моделювання отримано такі основні результати:

Запропонована архітектура перевищує традиційні схеми TDM та LDM без D2D-зв'язку за показниками ймовірності відмови та ергодичної ємності, що свідчить про її вищу спектральну ефективність та надійність передавання даних.

Підвищення потужності передавання і збільшення кількості антен базової станції забезпечують покращення пропускної здатності системи та зменшення ймовірності відмови користувачів.

Оптимізація потужності повнодуплексного передавання є критичною для зменшення власних завад і досягнення максимальної ефективності використання спектра.

Інтеграція технологій beamspace MIMO, NOMA, Full-Duplex D2D та LDM-мультиплексування створює передумови для побудови високопродуктивних бездротових мереж 6G з гнучким управлінням ресурсами, високою пропускною здатністю та низькою затримкою передачі.

Отримані результати можуть бути використані при розробленні енергоефективних архітектур широкомовних систем 5G/6G, орієнтованих на підтримку мультимедійних та критично важливих сервісів у майбутніх телекомунікаційних мережах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. N. Ye, X. Li, H. Yu, L. Zhao, W. Liu, X. Hou, Deepnoma: a unified framework for noma using deep multi-task learning. IEEE Trans. Wirel. Commun., 1 (2020)
2. Z. Wang, Q. Liu, M. Li, W. Kellerer, Energy efficient analog beamformer design for mmwave multicast transmission. IEEE Trans. Green Commun. Netw. 3, 552–564 (2019)
3. Стратегії технологічного розвитку апаратного забезпечення інфокомунікаційних радіомереж [Текст] / М. В. Васильківський, О. С. Городецька, Б. С. Климчук, В. В. Говорун // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2023. – № 1. – С. 83-91.
4. Оптимізація інтелектуальних телекомунікаційних мереж [Текст] / М. В. Васильківський, А. В. Прикмета, А. Олійник, Д. В. Нікітович // Вісник Хмельницького національного університету. Серія «Технічні науки». – 2023. – № 1. (317). – С. 33–41.
5. Оптимізація адаптивних радіосистем із використанням алгоритмів ШІ та МН [Текст] / М. Васильківський, Д. Нікітович, Н. Грабчак, і Н. Якубівська // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2023. – № 2. – С. 112–124.
6. Оптимізація програмно-конфігурованих літаючих мереж доступу [Текст] / М. Васильківський, А. Прикмета, А. Олійник, Н. Ксьондз // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2023. – № 52. – С. 128-139.

Васильківський Микола Володимирович — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Прикмета Андрій Володимирович — аспірант групи 172-22а, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: botan.mua@gmail.com

Васильківський Андрій Олегович — студент групи ТСМ-24м, факультет інформаційних електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: showavhip@gmail.com

Vasykivskyi Mykola V. — candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Communication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mvasylkivskyi@gmail.com

Prykmeta Andrii V. — graduate student of group 172-22a, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: botan.mua@gmail.com

Vasykivskyi Andrii O. - student of group TSN-24m, Faculty of Information Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: showavhip@gmail.com