

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ВУЛИЧНИХ БАГАТОДІАПАЗОННИХ СИСТЕМ 6G ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РОЗПОДІЛЕНОГО MIMO В МІСЬКИХ УМОВАХ

Лютій А.О., Коляденко Ю.Ю.

Кафедра інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
Україна

E-mail: artem.liutyi@nure.ua,
yuliia.koliadenko@nure.ua

Abstract

The article presents the results of system-level simulation of outdoor multiband 6G networks in a dense urban environment using millimeter-wave (28 GHz) and sub-terahertz (100 GHz) bands. The simulator implements distributed MIMO, intelligent reflective surfaces (RIS), unmanned aerial TRP, massive MIMO arrays and adaptive precoding (SVD/MRC). Evaluation in a realistic scenario with high-rise buildings and moving users demonstrates that distributed MIMO provides a significant throughput increase up to 190 Gbit/s peak in downlink and up to 80 Gbit/s in uplink for individual users — even under predominantly line-of-sight propagation and limited multipath components.

Використання міліметрових (mmWave) та субтерагерцових (sub-THz) радіохвиль є однією з ключових особливостей перспективних мереж 6G, що забезпечує досягнення терабітних швидкостей передачі даних. Проте в міських умовах ці високочастотні сигнали зазнають значного загасання через блокування будівлями, деревами, атмосферне поглинання та погодні фактори, що призводить до різкого зниження покриття та пропускної здатності вуличних систем. Традиційні методи компенсації (масивне MIMO, beamforming) виявляються недостатніми в середовищах з переважанням прямої видимості (LOS) та обмеженою багатопроменевістю. Актуальною залишається проблема оцінки реальної продуктивності багатодіапазонних вуличних мереж 6G та пошуку ефективних технологічних рішень (розподілене MIMO, RIS, UAV-TRP), які дозволять подолати вказані обмеження та забезпечити стабільно високі швидкості для більшості користувачів у складному міському середовищі.

У роботі проведено системне моделювання вуличної багатодіапазонної мережі 6G у міських умовах з одночасним використанням діапазонів Sub-6 ГГц (центральна частота 4,7 ГГц, смуга 100 МГц), mmWave (28 ГГц, смуга 400 МГц) та sub-THz (100 ГГц, смуга 8000 МГц). Симулятор реалізує повний стек технологій: аналоговий і цифровий beamforming, розподілене MIMO, попереднє кодування SVD та MRC, прийом MMSE-IRC, адаптивну модуляцію та вибір рангу MIMO (1-8 просторових потоків), інтелектуальні відбиваючі поверхні (RIS) та безпілотні ретрансляційні пункти (UAV-TRP). Модель каналу – багатопроменева модель Релея з урахуванням просторової кореляції, втрат на шляху, поглинання атмосферними газами та блокування будівлями.

Міський сценарій моделювання наведено на рисунку 1. Відкрита громадська площа оточена висотними будівлями, площа обсаджена деревами, додаткових відбиваючих об'єктів немає. Стаціонарні TRP та RIS розміщені на фасадах будівель і вуличних ліхтарях. Безпілотний TRP здійснює політ на висоті 30-50 м вздовж дороги для обслуговування користувачів у центрі площі, що перебувають у зоні тіні.

Потужність передачі кожного TRP — 30 дБм, дуплекс — TDD (DL/UL 7:3). Кожний TRP оснащений масивною MIMO-антоною планарного типу з 9 підматрицями (загалом до 1152 елементів). У сценарії — 22 мобільні станції: пішоходи (3 км/год), роботи та автономні автомобілі (60 км/год).

Для дослідження обрано реалістичний міський сценарій, що відтворює типову відкриту громадську площу в центрі міста, оточену висотними будівлями. На рисунку 1 наведено візуалізацію цього сценарію в симуляторі (рис. 1)

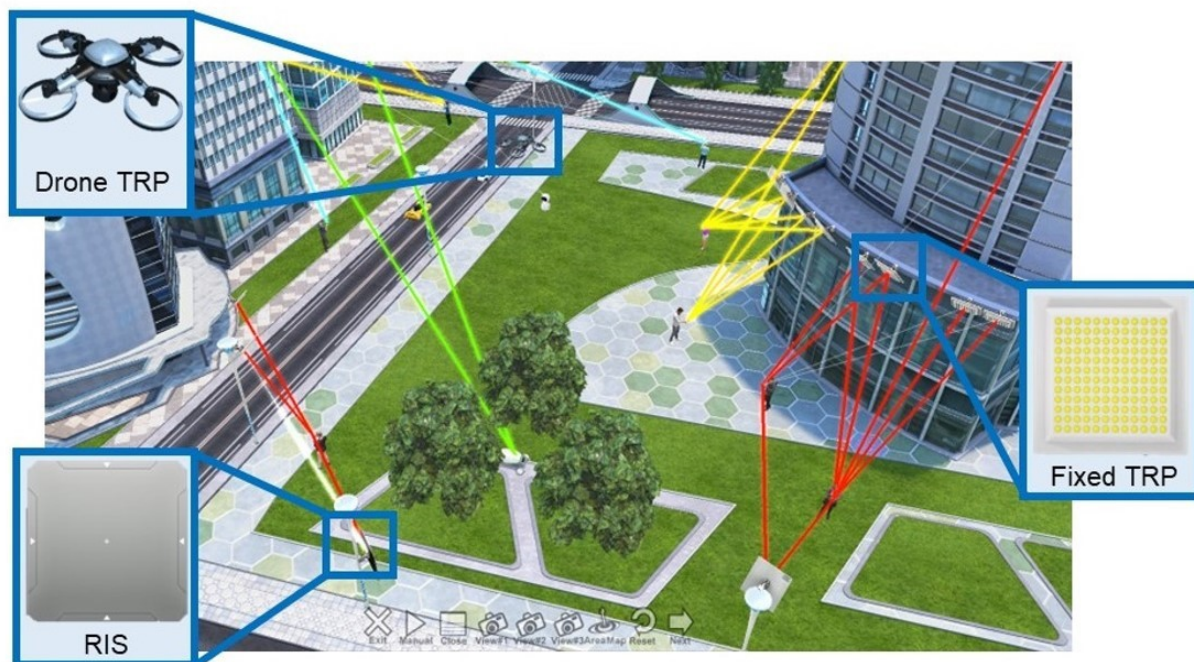


Рис. 1. Міський сценарій моделювання вуличної багатодіапазонної системи 6G (6G simulator in urban scenario: відкрита площа, оточена висотними будівлями; площа обсаджена деревами; стаціонарні TRP та RIS розміщені на фасадах будівель і вуличних ліхтарях; рухомий UAV-TRP забезпечує покриття центральної частини; 22 мобільні станції різного типу – пішоходи, роботи, автономні автомобілі)

Для кількісного порівняння ефективності розподіленого MIMO проведено дві серії розрахунків: без його застосування та з увімкненим розподіленим MIMO (прекодинг SVD). Основні отримані показники пропускної здатності узагальнено в таблиці 1.

Табл. 1. Порівняльні показники пропускної здатності залежно від використання розподіленого MIMO

Показник	Без розподіленого MIMO	З розподіленим MIMO (SVD)
Частка користувачів з пропускною здатністю >1 Гбіт/с у DL	≈70 %	≈90 %
Частка користувачів з пропускною здатністю >100 Гбіт/с у DL	≈9 %	≈18 %
Частка користувачів з пропускною здатністю 50–100 Гбіт/с у UL	<1 %	>10 %
Пікова пропускна здатність користувача в глибокій тіні (UE №22) у DL	стабільно >100 Гбіт/с	до 190 Гбіт/с
Пропускна здатність користувача в глибокій тіні (UE №22) у UL	≈40 Гбіт/с	до 80 Гбіт/с

Отримані результати підтверджують високу ефективність розподіленого MIMO навіть в міських умовах з переважанням прямої видимості та обмеженою багатопроблемністю, де традиційне масивне MIMO втрачає можливості просторового мультиплексування.

Комбінація широкопasmового sub-THz діапазону, розподіленого MIMO, RIS та мобільних UAV-TRP забезпечує пікові швидкості понад 190 Гбіт/с для окремих користувачів та середню пропускну здатність понад 100 Гбіт/с для більшості абонентів в складному міському середовищі.

Застосування розподіленого MIMO спільно з RIS та безпілотними ретрансляторами дозволяє реалізувати вуличні багатодіапазонні системи 6G, що повністю відповідають вимогам надвисокошвидкісних сервісів майбутнього, голографічної телеприсутності, extended reality, терабітних сенсорних мереж та автономного транспорту високого рівня.

Література

1. Zhang Z., Xiao Y., Ma Z., Xiao M., Ding Z., Lei X., Karagiannidis G. K., Fan P. 6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies. *IEEE Veh. Technol. Mag.* 2019. Vol. 14, No. 3. P. 28-41.
2. Лютий А. О., Коляденко Ю. Ю. Перспективи використання субтерагерцових хвиль у вуличних мережах 6G *Вісник ХНУРЕ*. 2025. № 1. С. 56-65.
3. Jiang W. et al. Terahertz Communications and Sensing for 6G and Beyond: A Comprehensive Review. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2023. Vol. 26. P. 2326-2381.