

Ніколаєв Є.Ю., студент; Яковець В.П., аспірант;
Макаренко А.О., д.т.н.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ МІМО-ІНТЕГРАЦІЇ З ТЕХНОЛОГІЯМИ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

Nikolaiev Y.Y., Yakovets V.P., Makarenko A.O. Study of MIMO integration methods with fifth generation technologies. It is expected that with the general deployment of cellular 4G systems the new technologies would be required to satisfy the heightening demand for higher data transfer speeds and lower delays while retaining low deployment and maintenance costs. Multiple array technologies such as MIMO will play a key role in the forthcoming 5G and 6G systems. This paper will present several MIMO architectures and beamforming solutions for cm- and mm-wave 5G systems that work in the 20 (3-30 GHz) and 100 (30-300 GHz) spectrums. These spectrums provide much higher potential for small cell deployment with the use of large-scale antenna arrays due to the higher data capacity than that of the traditional cellular network systems. The mm-wave 5G ELA systems that will gradually replace LTE are going to have higher capacity with the use of Frequency Division Duplexing (FDD) because it enables the usage of uplink/downlink reciprocity in controlling the beamforming operation. It is, however, must be noted that MIMO technology has a key problem that consists of obtaining the necessary information needed to control the transmit and receive algorithms, the solution of which will be discussed in this paper. The array calibration errors that can cause severe performance losses are also going to be considered. The paper therefore will focus on the performance and implementation issues of different multi-user-MIMO (MU-MIMO) solutions for transmission in the cm- and mm-wave bands as well as key problems that follow the transmit MIMO processing for 5G systems. Performance evaluation of RF-based architecture and the traditional baseband transmission methodology for downlink MU-MIMO implementation as well as several transmission schemes to highlight the issues with MU-MIMO for 5G and the solutions to them will be provided.

Keywords: ELA, MU-MIMO, GoB, SNR, OFDM, beamforming, codebook.

Ніколаєв Є.О., Яковець В.П., Макаренко А.О. Дослідження методів МІМО-інтеграції з технологіями п'ятого покоління. Очікується, що з розгортанням стільникових систем 4G будуть потрібні нові технології для задоволення попиту на більш високі швидкості передачі даних і менші затримки при збереженні витрат на технічне обслуговування. У цьому документі представлено кілька рішень МІМО для систем 5G сантиметрового та міліметрового діапазону, які працюють у діапазонах частот 3–30 та 30–300 ГГц. У документі основна увага буде приділена характеристикам і питанням реалізації різних розрахованих на багато користувачів рішень МІМО (MU-MIMO) для передачі в см- і мм-діапазонах.

Ключові слова: ELA, MU-MIMO, GoB, SNR, OFDM, формування власного променя, кодова книга.

Вступ

У зв'язку з широким розгортанням стільникових систем 4G, галузь стільникового зв'язку шукає нові технології та нові моделі розгортання, щоб задовольнити постійно зростаючий попит на більш високі швидкості передачі даних і менші затримки за менших витрат. Враховуючи велику кількість спектру, доступного в діапазонах сантиметрових і мм-хвиль, проводяться значні дослідження щодо використання цих діапазонів (зокрема 20 ГГц та 100 ГГц) для стільникових систем 5G, які, як очікується, будуть розгорнуті після 2020 року [1].

Набагато більший потенціал для пропускної здатності системи, ніж доступний в традиційних смугах стільникового зв'язку (більший приблизно у 100 разів), а також потенціал для великомасштабних антенних решіток (через меншу довжину хвилі) роблять ці смуги привабливими для розгортання малих стільників з високою пропускною спроможністю для сценаріїв із великою кількістю користувачів.

Порівняно з традиційними системами стільникового зв'язку, що працюють на частоті близько 2 ГГц, передача в діапазонах радіохвиль має значно менш сприятливий бюджет зв'язку через нижчу вихідну потужність підсилювача потужності, більші втрати на тракці та більші втрати при затіненні через значно зменшені ефекти дифракції та дисперсії.

Однак, менша довжина хвилі в мм-діапазоні означає, що в одній фізичній зоні можна розмістити більше антен. Тому очікується, що системи 5G мм-хвиль розгортатимуть великомасштабні антенні решітки з десятками або навіть сотнями антен, щоб пом'якшити погані умови розповсюдження в цих діапазонах. Зокрема, розгорнувши більше антен в тій самій фізичній зоні, можна легко компенсувати збільшення втрат на тракті, скажімо, при переході з 30 ГГц на 70 ГГц.

Технології з кількома антенами, які з великим успіхом розгорнуті в LTE версії 8-11, обмежуються не більше ніж 8 антенними портами на точку передачі та зазвичай розгортаються з трансивером, керуючим кожним антенним портом. Однак методологію MIMO в системах 4G і системах сантиметрових хвиль 5G не можна просто повторно використовувати в діапазонах радіохвиль, враховуючи потребу у більшій кількості антен, щоб подолати низький бюджет зв'язку.

Крім того, з десятками чи сотнями антенних елементів використання трансивера за кожним антенним елементом споживатиме неприйнятну кількість енергії (особливо D/A та A/D), а також, ймовірно, буде непомірно дорогим, що означає орієнтовані на RF або гібридні підходи можуть бути більш привабливими. У цьому документі представляється огляд рішень MIMO та формування променя для см- та мм-хвильових систем 5G. Описується базова смуга, радіочастотна та гібридна архітектури та розглядаються різні питання реалізації, такі як калібрування масиву та отримання стану каналу для реалізації однокористувацьких (SU – Single-User) та багатокористувацьких (MU – Multi-User) MIMO для систем 5G.

Увага буде зосереджена на методах передачі MU-MIMO та порівнянні продуктивності кількох методів-кандидатур: підхід радіочастотної «сітки променів», традиційний підхід з нульовим примусом передачі з обробкою базової смуги та підходи кодової книги і направлення променя на основі коваріації. Показано, як помилки калібрування масиву можуть спричинити серйозне зниження продуктивності, і тому вони повинні бути важливим компонентом будь-якої стратегії передачі MIMO для систем 5G.

Технологія MIMO для мм-хвильової 5G ELA

Очікується, що мм-хвильові системи 5G Enhanced Local Area (ELA) будуть розгорнуті зі значно вищою смугою пропускання, ніж LTE (наприклад, 1-4 ГГц), тоді як см-хвильові системи матимуть смугу пропускання близько 100 МГц. При розгортанні широкомасштабної антенної решітки з формуванням радіочастотного променя, дуплекс з часовим поділом є гарною альтернативою дуплексу з частотним поділом через можливість використовувати взаємність висхідної/низхідної лінії зв'язку для керування операцією формування променя. Комбінація одного трансивера, що працює з широкою смугою пропускання з формуванням радіочастотного променя, означає, що передавач не може легко виконувати частотно-селективне формування променя, тому часове мультиплексування є кращим перед частотним. Мається на увазі, що частотно-селективне мультиплексування/планування не використовуватиметься, але для користувачів плануватиметься розподіл, який охоплюватиме всю смугу пропускання [2].

Архітектури MIMO, орієнтовані на базову смугу

Технології з декількома антенами, що застосовуються базовими станціями макростільникового зв'язку LTE, як правило, використовують архітектуру, як показано на рис. 1, де кожен порт антени керується трансивером, а методи з декількома антенами працюють у базовій смузі (тобто, архітектура MIMO базової смуги частот). Розширення багатопотокової передачі та прийому включають включення кількох вагових коефіцієнтів прийому та передачі в блок обробки основної смуги MIMO. Поточний стандарт LTE підтримує до 8 антенних портів на точку передачі, але концепція масового MIMO або повновимірного MIMO розглядається для забезпечення більш ніж 8 портів з акцентом на MU-MIMO високого рівня в LTE Rel-13. Ці методології передбачають наявність трансивера за кожною антеною, а також розглядаються для систем 5G більш високих частот.

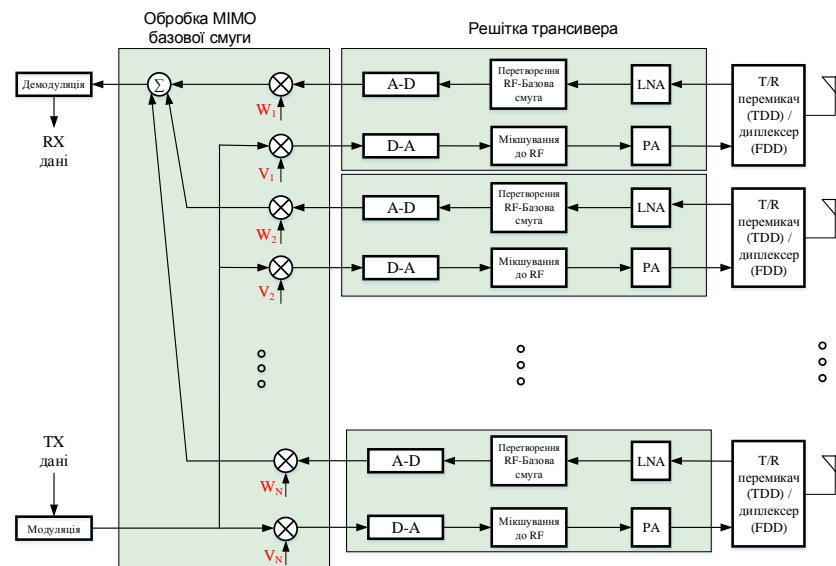


Рис. 1. Архітектура MIMO базової смуги – трансивер за кожним портом антени – єдиний просторовий потік при передачі та прийомі

RF-орієнтована та гібридна MIMO архітектури

Використання великомасштабних антенних решіток у мм-хвильових діапазонах створює низку проблем через високу смугу пропускання системи. Використання окремого трансивера за кожним елементом антени стає значно складнішим у великомасштабній решітці не лише з міркувань вартості, але також через те, що широка смуга пропускання вимагає дуже високошвидкісних A/D та D/A процесорів, які потребують значного енергоспоживання. У результаті для систем 5G розглядаються два альтернативних класи архітектур передавання та прийому: повністю радіочастотна архітектура, де керування MIMO та формування променя виконується на RF, і гібридна архітектура, де керування MIMO та формування променя розділено між RF і основною смугою. На рис. 2 показана архітектура RF MIMO, де один трансивер управляє антенною решіткою, а обробка решітки передачі та прийому виконується за допомогою радіочастотних компонентів, які мають фазовий зсув і потенційні можливості регулювання посилення. На рис. 3 показаний приклад гібридної архітектури, де два потоки формуються променем на радіочастоті на додаток до обробки основної смуги MIMO [3].

Підхід сітки променів

Ключовою проблемою розробки будь-якої методології MIMO є проблема отримання необхідної інформації, необхідної для керування алгоритмами передачі та прийому. У системах 4G режими SU-MIMO та MU-MIMO зазвичай керуються на основі оцінок відгуків каналів на окремих антенах. Однак у системі MIMO міліметрового діапазону, що працює на радіочастоті, отримання відомостей про канали в окремих елементах антени стає складним, враховуючи необхідність формування радіочастотного променя для подолання низького бюджету зв'язку. Одним із рішень, прийнятим IEEE 802.11ad, є використання вузьких променів, що перемикаються, сформованих в RF як на передавачі, так і на приймачі, і для передачі даних вибирається найкраща пара променів передачі-прийому. Цю стратегію формування набору квазіпроменів, що не перекриваються, для покриття зони обслуговування часто називають підходом «сітки променів», і вона має перевагу, оскільки потребує лише одного приймача, але має невелику гнучкість з точки зору ваг передачі. Навпаки, знаючи характеристику каналу на кожному антенному порті (як у випадку з архітектурою базової смуги, що зображена на рис. 1), ваги передачі можна спроектувати, наприклад, для виконання направлення променя до бажаного користувача з нульовим примусом до небажаних користувачів через критерій нульового примусу.

SU-MIMO для см- та мм-хвильових 5G систем

У низхідній лінії зв'язку рішення SU-MIMO включають передачу одного або кількох потоків даних одному користувачеві за раз. Просторове мультиплексування SU-MIMO передбачає передачу більш ніж одного потоку одному користувачеві, а розсіювання за багатопроменевістю в каналі дозволяє приймальній антенній решітці користувача розділяти кілька переданих потоків. Розширення концепції комутованого променя для включення просторового мультиплексування є складним, оскільки ранг каналу зазвичай оцінюється на основі знання повної матриці каналу. Однак, з високим рівнем поляризаційної дискримінації на мм-хвилях, двопотокове просторове мультиплексування може бути досягнуто за допомогою перехресно поляризованої решітки на рис. 2 або на рис. 3, де один радіочастотний промінь подається на один набір кополяризованих антенних елементів і другий промінь прикладається до іншого набору спільно поляризованих елементів антени.

MU-MIMO для см- та мм-хвильових 5G систем

Рішення MU-MIMO для низхідної лінії передбачають передачу даних двом або більше користувачам на тих самих частотно-часових ресурсах. У базових станціях LTE, які використовують архітектуру, наведену на рис. 1, MU-MIMO найкраще працює з точним знанням відгуку каналу низхідної лінії зв'язку між кожною передавальною та кожною приймальною антеною. Маючи ці знання, база може розрахувати ваги передачі, які вказують на потрібного користувача, мінімізуючи при цьому енергію, що передається іншим спільним користувачам (наприклад, використовуючи критерій нульового примусу). У мм-хвильових системах 5G з архітектурою, наведеною на рис. 2, MU-MIMO можна реалізувати в рамках концепції комутованого променя, де вибирається найкращий вузький промінь для кожного користувача в парі, а перехресні завади між користувачами в парі пасивно мінімізуються через низькі бічні пелюстки променів [4].

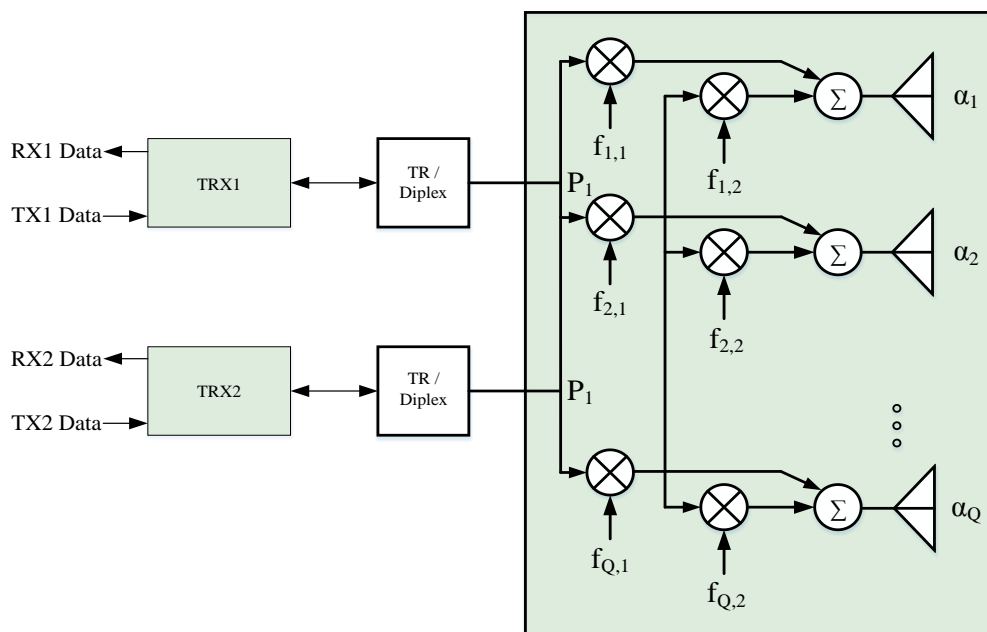


Рис. 2. Радіочастотна MIMO архітектура: Q антени, два радіочастотні промені, 2-потокowe просторове мультиплексування, кероване в RF

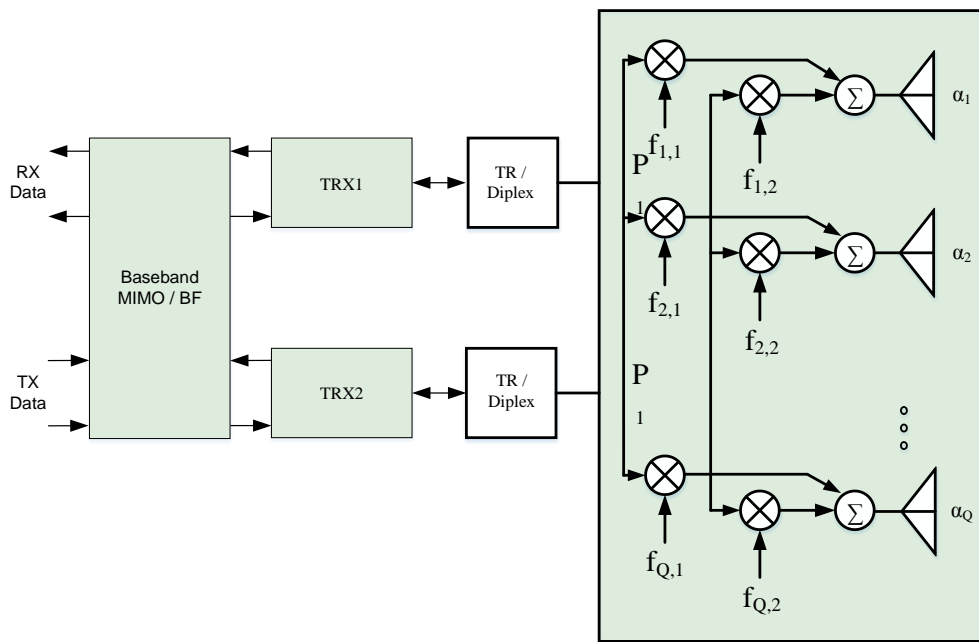


Рис. 3. Приклад гібридної радіочастотної/базової смуги МІМО архітектури: два формувачі радіочастотного променя та два антенні порти базової смуги

Оцінка ефективності

У цьому розділі розглядається продуктивність низхідного зв'язку MU-MIMO з альтернативами впровадження, описаними в попередньому розділі: зокрема, архітектура на основі RF на рис. 2 проти традиційної методології передачі в базовій смугі на рис. 1. На додаток до показу відмінностей продуктивності, також показано вплив помилок калібрування масиву на схеми передачі. Розглядаються чотири схеми передачі, щоб висвітлити деякі ключові проблеми з MU-MIMO для 5G: Перша – це підхід сітки променів (GoB – Grid-of-Beams), що працює на радіочастоті, коли кожен користувач вибирає та вказує базовій станції бажаний промінь. Друга – це підхід нульового примусу (ZF – Zero-Forcing), заснований на зворотному зв'язку кодової книги (CB – Codebook). Третя – передача з нульовим примусом на основі знання коваріаційної матриці низхідної лінії зв'язку. Четверта – це простий підхід керування променем, заснований на найбільшому власному векторі коваріаційної матриці низхідної лінії зв'язку (так зване формування власного променя або EBF – Eigen-beamforming). Підхід GoB працює з RF-архітектурою, зображеною на рис. 2, тоді як інші підходи працюють з архітектурою основної смуги, зображеною на рис. 1. Ці чотири схеми передачі можна класифікувати залежно від того, чи включає алгоритм передачі нульове керування (ZF на основі CB зворотного зв'язку або коваріаційної матриці) чи ні (GoB та направлення променя на основі коваріаційної матриці). Ці схеми також можна класифікувати залежно від того, чи існує ефект квантування від кінцевого набору пучків (ZF на основі GoB і CB) чи ні (методи на основі коваріаційної матриці) [5, 6].

Розглянемо базову станцію з 16-елементною антенною решіткою з рівномірно розташованими вертикальними диполями, які одночасно передають чотирьом користувачам у режимі MU-MIMO. Щоб уможливити справедливе порівняння, промені, що використовуються для підходу RF GoB, такі ж, як записи CB у підході ZF на основі CB.

Матриця пучків в обох випадках є просто матрицею \mathbf{F} , стовпці якої є DFT-векторами, де (n,m) -ний запис \mathbf{F} задано як:

$$F_{nm}(N,\Delta) = e^{-j\frac{2\pi}{N}nm\Delta} \text{ for } n = 0,1,\dots,N-1, m = 0,1,\dots,(N/\Delta) - 1 \quad (1),$$

де N – кількість антен, а Δ вибрано рівним 0,5.

У підході ZF на базі основної смуги CB користувач вимірює канал низхідної лінії зв'язку, вибирає найкращий промінь у CB і повертає відповідний індикатор. Потім базова станція використовує цей найкращий промінь як оцінку каналу для цього користувача та обчислює ваги

передачі ZF на основі найкращих променів для мультиплексованих користувачів. У підході RF GoB кожен мультиплексований користувач вибирає свій найкращий промінь, а база використовує вибрані промені для передачі користувачам без додаткового нульового керування. Для цих підходів також розглядається вплив помилок калібрування масиву на шляхи передачі на базовій станції. Для каліброваного випадку кожен шлях передачі має постійне посилення та нульову фазу по всій смужі пропускання на кожному шляху передачі. Для некаліброваного масиву розглянуто два джерела помилок: випадкові широкосмугові фази та неузгодженість синхронізації. Випадкові широкосмугові фазові помилки моделюються як проста випадкова фаза на кожному шляху передачі, рівномірно розподілена між 0 і 2π , яка є постійною в часі та частоті. Розбіжність синхронізації моделюється за допомогою максимального значення затримки, де один шлях передачі випадково вибирається як опорний з нульовою затримкою, другий шлях передачі випадково вибирається так, щоб мати зміщення часу, що дорівнює максимальному значенню затримки, а інші шляхи мають час зсув рівномірно розподілений між нулем і максимальним значенням затримки. Ці фази та затримки є постійними протягом вибору кодової книги та інтервалів передачі даних, тому вони фактично є частиною загального каналу низхідної лінії зв'язку, який використовується для вибору променя GoB, вибору СВ та обчислення коваріаційної матриці. Їх ефект полягає в основному в спотворенні загального ефективного каналу низхідної лінії зв'язку, який бачать користувачі.

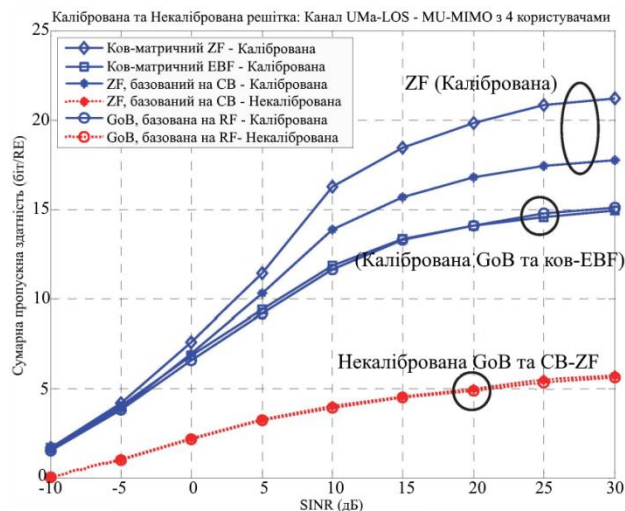


Рис. 4. Сумарна пропускна здатність на рівні каналу з ідеальним калібруванням і широкосмуговими фазовими помилками

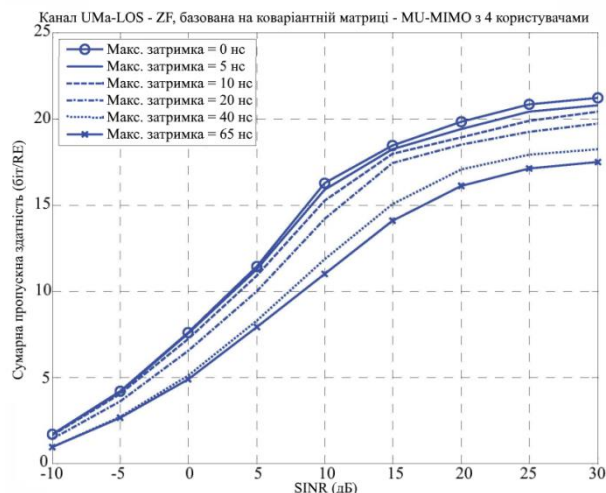


Рис. 5. Сумарна пропускна здатність на рівні з'єднання з помилками затримки передавача – нульовий примус на основі коваріаційної матриці

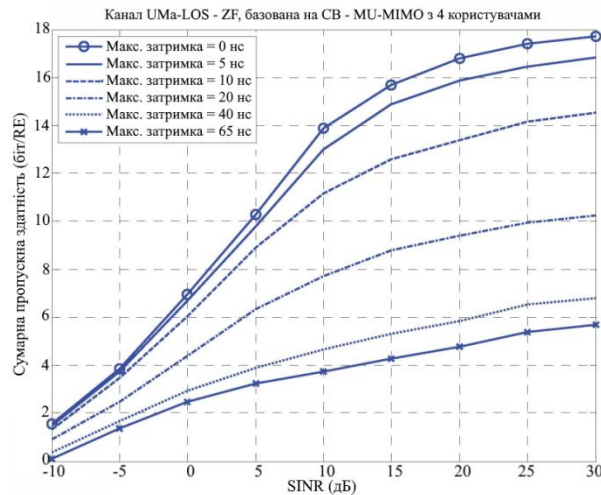


Рис. 6. Сумарна пропускну здатність на рівні зв'язання з помилками затримки передавача – нульовий примус на основі кодової книги

На рис.4–6 показана середня сумарна пропускну здатність на рівні зв'язку порівняно з SNR для симуляції на рівні зв'язку MU-MIMO, де кожен мультиплексований користувач має однакове SNR. На цих графіках було створено велику кількість реалізацій каналу для кожного значення SNR відповідно до моделі каналу прямої видимості (LOS – Line of Sight) 3GPP UMa. Припускаємо ідеальний вибір пучка та індексу СВ для підходів ZF на основі GoB та СВ відповідно, а підходи на основі коваріаційної матриці працюють із ідеальним знанням каналу (нульова затримка зворотного зв'язку). Ідеальна адаптація каналу зв'язку для кожного користувача MU-MIMO передбачалася, коли швидкість модуляції та кодування вибиралася на основі ідеального знання каналу низхідної лінії зв'язку та вагових коефіцієнтів передачі. І адаптація каналу, і прогноз пропускну здатності низхідного каналу базувалися на критеріях відображення експоненціального ефективного SNR. Для оцінки була змодельована система OFDM на частоті 20 МГц см-хвиль із широкосмуговим плануванням, і зазначена пропускну здатність рівня зв'язку є середньою кількістю успішно доставлених бітів на елемент ресурсу OFDM (RE), підсумованих для всіх чотирьох мультиплексованих користувачів. Подібні тенденції спостерігалися для систем міліметрового діапазону та більшої смуги пропускання.

На рис. 4 показано вплив помилок калібрування фази (з нульовими помилками синхронізації в трактах передачі) для чотирьох методів передачі. Завдяки каліброваним решіткам ZF на основі коваріації перевершує інші методи, але за рахунок потреби трансивера за кожною антеною. GoB і EBF на основі коваріації мають майже ідентичну продуктивність, що вказує на те, що квантування променя мало що можна втрачати в підходах лише керування променем. Для некаліброваних фаз передачі практично не було погіршення з ZF або EBF на основі коваріації, тому ці криві опущені для ясності. Однак продуктивність ZF на основі GoB і СВ значно погіршується, оскільки випадкові фази сильно спотворюють промені на основі DFT.

На рис. 5 і на рис. 6 показано вплив розбіжності синхронізації трансивера на продуктивність нульового примусу на основі коваріації та СВ відповідно. Збільшення максимального значення затримки серйозно погіршує продуктивність обох методів, але зауважте, що погіршення зі зворотним зв'язком СВ значно більше, ніж зі знанням коваріаційної матриці. Ці результати підкреслюють значну потребу в точному калібруванні масиву для систем 5G MU-MIMO.

Висновки

У цій статті розглянуто кілька архітектур MIMO для мм-хвильових систем 5G і висвітлено проблеми впровадження, пов'язані з використанням MU-MIMO. Показано продуктивність кількох потенційних методів передачі MU-MIMO для систем 5G і продемонстровано

необхідність точного калібрування антенної решітки з великомасштабними антенними решітками, які виконують MU-MIMO.

Список використаної літератури:

1. Xanthos, Yunis & Lyu, Wanting & Yang, Songjie & Assi, Chadi & Zou, Xianbing & Wei, Ning. (2021). Joint Localization and Beamforming for Reconfigurable Intelligent Surface Aided 5G mmWave Communication Systems.
2. Ouyang, Chongjun & Xu, Hao & Zang, Xujie & Yang, Hongwen. (2021). Capacity Scaling Law in Massive MIMO with Antenna Selection. 10.48550/arXiv.2208.04252.
3. Dalal, Jyoti & Nandal, Vikas & Nandal, Deepak. (2021). BER Performance Analysis of MMSE with ZF and ML Symbol Detection for Hard Decision MU-MIMO LTE on Rayleigh Fading Channel. 10.1007/978-981-15-8335-3_25.
4. Jakubisin, Daniel. (2012). Array Processing for Mobile Wireless Communication in the 60 GHz Band.
5. Krishnamoorthy, Aravindh & Schober, Robert. (2021). Downlink Massive MU-MIMO with Successively-Regularized Zero Forcing Precoding. IEEE Wireless Communications Letters. PP. 1-1. 10.1109/LWC.2022.3218597.
6. Bai, Zijian & Spiegel, Christoph & Kocks, Christian & Drewes, Christian & Berkmann, Jens & Horvat, Michael & Gunzelmann, Bertram & Scholand, Tobias & Bruck, G.H. & Jung, P. (2010). On the physical layer performance of the release 8 E-UTRA downlink. 10.1109/ISCCSP.2010.5463467.

Автори статті

Ніколаєв Євгеній Юрійович – студент, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Яковець Всеволод Петрович – аспірант, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Макаренко Анатолій Олександрович – д.т.н., професор, професор кафедри Мобільних та відеоінформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Authors of the article

Nikolaiev Yevhenii Yuriiovich – student, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Yakovets Vsevolod Petrovych – postgraduate, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Makarenko Anatoliy Oleksandrovyich – Doctor of Science (technic), professor, professor of Department of Mobile and videoinformation technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Дата надходження в редакцію: 02.02.2022 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Т.Б. Гордієнко