

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-8>
УДК 621.396.2

БОЙКО ЮЛІЙ

Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>
e-mail: boiko_julius@ukr.net

ПЯТИН ІЛІЯ

Хмельницький політехнічний фаховий коледж національного університету «Львівська політехніка»
<https://orcid.org/0000-0003-1898-6755>
e-mail: ilkhmel@ukr.net

ГАВРОНСЬКИЙ ВІТАЛІЙ

Хмельницький політехнічний фаховий коледж національного університету «Львівська політехніка»
<https://orcid.org/0000-0002-1529-1272>
e-mail: gavronskiy@gmail.com

КОРОТУН МИКОЛА

Хмельницький національний університет
e-mail: korotunmiko1310@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗГОРТКИ ПРОМЕНЯ ПІД ЧАС ПОЧАТКОВОГО ДОСТУПУ В МЕРЕЖАХ 5G NR

В роботі розглянуті процедури керування променем у 5G. Генерується пакет сигналу синхронізації NR і формується промінь кожного SSB в пакеті, що дозволяє здійснити сканування за напрямками азимуту і кута місця. Сформований промінь передається просторовим каналом розсіювання. Отриманий сигнал обробляється за допомогою кількох променів приймача, вимірюється потужність прийнятого опорного сигналу (RSRP) для кожної пари променів передачі-прийому і визначається краща пара променів з максимальним RSRP. Досліджені спектрограма пакету сигналів синхронізації, діаграми спрямованості антен передавача і приймача. Розглянуті показники, що дозволяють оцінити пакет сигналів синхронізації: рівні RSRP, RSSI, RSRQ при різній ширині смуги часто. Розглянута опорна сітка первинного сигналу синхронізації. Досліджена розгортка променя на боці передавача. Проведено дослідження втрат на шляху розповсюдження сигналу та середньоквадратичного значення шуму на приймачі від відстані між передавачем і приймачем.

Ключові слова: Управління променем, міліметрові хвилі, діаграма спрямованості, сканування променя, фазована антенна решітка, 5G.

BOIKO JULIY, KOROTUN MYKOLA

Khmelnytskyi National University

PYATIN ILYA, GAVRONSKIY VITALIY

Khmelnytskyi Politechnic Professional College by Lviv Politechnic National University

MODELING OF THE BEAM SWEEPING PROCESS DURING INITIAL ACCESS IN 5G NR NETWORKS

The paper discusses the procedures for controlling the 5G beam. A packet of the NR synchronization signal is generated and a beam of each SSB in the packet is formed, which allows scanning in the azimuth and elevation directions. The formed beam is transmitted via a spatial scattering channel. The received signal is processed using several receiver beams, the power of the received reference signal (RSRP) is measured for each pair of transmit-receive beams, and the best pair of beams with the maximum RSRP is determined. The spectrogram of the synchronization signal packet, the directivity diagrams of the transmitter and receiver antennas are studied. The indicators that allow evaluating the synchronization signal packet are considered: RSRP, RSSI, RSRQ levels at different frequency bandwidths, a map of RSRP values, which allows you to visually see which pair of beams gives the highest power of the received signal. The reference grid of the primary synchronization signal is considered. The beam sweep on the transmitter side is studied. The control vector for the transmitter antenna array has been calculated, the angle of the scatterer relative to the antenna array has been determined. The signal propagation losses and the mean square noise value at the receiver have been studied depending on the distance between the transmitter and the receiver. The beam width in azimuth has been studied depending on the number of antennas in the antenna array. The beam width in azimuth and elevation has been studied depending on the control direction. The investigated Beam Sweeping and Beam Determination procedures indicate that transmitting eight SSB blocks every 20 ms (one full sweep on the gNB side) requires $8 \times 20 = 160$ ms for a full duplex sweep ($8 \text{ Tx} \times 8 \text{ Rx}$) if the UE changes direction for each SSB packet. From the results of the study of signal loss versus distance, it can be concluded that at a distance between the transmitter and receiver of 700 m, when changing the frequency from 0.9 to 45 GHz, the path loss increases by 35 dB, while the root mean square (RMS) noise value on the receiving antenna decreases by 55 dB. When studying the beam width in azimuth from the number of antennas in the antenna array at different distances between antenna elements, it can be concluded that the beam width decreases with an increase in the number of antenna elements in the array and an increase in the distance between antenna elements. When studying the beam width from the control direction in a three-dimensional plane, it can be concluded that the central angles of the beam in the direction of wave propagation have a smaller width. At the edges of the control range ($\pm 60^\circ$ in azimuth), the beam will be wider due to larger side lobes.

Keywords: Beam steering, millimeter waves, radiation pattern, beam scanning, phased array antenna, 5G.

Стаття надійшла до редакції / Received 03.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Постановка проблеми

У зв'язку з зростанням кількості користувачів мобільних мереж та сервісів з високою пропускну здатністю, спектр на частотах нижче 6 GHz вже практично вичерпаний. Частоти мікрохвильового діапазону (mmWave) – понад 24 ГГц, надають ширші смуги пропускання, що дозволяє значно підвищити загальну швидкість передачі даних у мережі 5G. У діапазоні mmWave виникають суттєво відмінні фізичні характеристики: високе затухання сигналу; блокування лінії прямої видимості (тілом людини або стіною); часті

втрати зв'язку, обумовлені рухом UE; потреба у високоточному спрямуванні променів. Тому розробка надійного механізму управління променем, здатного забезпечити стійкий канал зв'язку є актуальною задачею.

Складність управління спрямованими зв'язками впливає з того, що через надвисоку спрямованість променів, потрібно забезпечити: початкову синхронізацію між мобільним абонентом (UE) і базовою станцією (gNB); регулярне оновлення інформації про якість каналу (RSRP, CSI-RS, SRS); швидке виявлення і компенсацію відмови променя (beam failure recovery); оптимальний вибір променя для кожної фази зв'язку (від початкового доступу до активного режиму передачі). Це потребує розробки інтелектуальних процедур і алгоритмів адаптації до змін у радіоканалі. Неefективне управління променем може стати причиною втрати зв'язку, перепідключення до іншої комірки, зменшення пропускної здатності.

Аналіз останніх джерел

У роботах [1-4] наведено аналіз процедур управління променями в системах 5G NR, зокрема в mmWave-діапазонах, і виділені основні виклики та майбутні напрямки розвитку цієї технології. Наголошено на високих втратах на шляху розповсюдження хвилі, блокуванні лінії прямої видимості через перешкоди, складність налаштування променя. У цих роботах не проведена кількісна оцінка ефективності процедур управління променем, зокрема для пакету сигналів синхронізації [5], для визначення оптимальних параметрів променів та мінімізації втрат на шляху в залежності від зміни впливаючих факторів.

Метою роботи є: дослідження процедур управління променем у мобільних телекомунікаціях 5G на міліметрових хвилях, оцінка впливу різних факторів на ширину променя, вибір оптимальної пари променів.

Система зв'язку з підсистемою управління променем

На рис. 1 приведена структурна схема системи зв'язку з підсистемою управління променем.

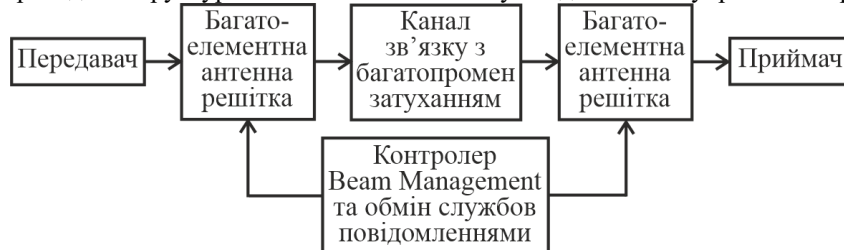


Рис. 1. Структурна схема системи зв'язку з підсистемою управління променем

У 5G запроваджено нові процедури керування променем (Beam Management) для встановлення і підтримання стійкого з'єднання за допомогою оптимальних пар променів gNB-UE. Ці процедури дозволяють забезпечити високу пропускну здатність і надійність з'єднання в mmWave.

Базова станція (gNB) представлена передавачем, оснащеним фазовою антенною решіткою, здатною до формування вузькоспрямованих променів. Передавач формує сигнал відповідно до стандарту 5G NR. Під час початкового доступу [6] генерується пакет сигналів синхронізації SSB (Synchronization Signal Block), що включає: Primary SSS (PSS) для синхронізації, Secondary SSS для ідентифікації стільника (ID), а також фізичний ширококомовний канал PBCH (з опорними сигналами демодуляції) для передачі основної системної інформації (MIB). Кожний блок SSB тривалістю 4 символи OFDM займає 20 ресурсних блоків по частоті і передається з певною діаграмою спрямованості. Група з кількох SSB утворює пакет SSB, тривалістю 5 мс, який повторюється з періодом 20 мс [6]. Передавач здійснює сканування променів (beam sweeping) – тобто послідовно випромінює кожен SSB-блок у різних напрямках, охоплюючи увесь сектор. Таким чином UE (мобільний абонент) може відсканувати всі напрямки і визначити, з якого променя сигнал найсильніший.

Модель каналу зв'язку повинна враховувати реальні умови поширення сигналу в діапазоні mmWave. Для цього використовується канал з багатопроменим затуханням. Він враховує: втрати поширення на великій відстані (значно більші на mmWave порівняно з частотами нижче 6 GHz); втрати сигналу через перешкоди і непостійність середовища; багатопромениві затримки та завмирання. Залежність втрат на шляху розповсюдження сигналу від відстані між передавачем і приймачем приведена на рис. 2. та рис. 3.

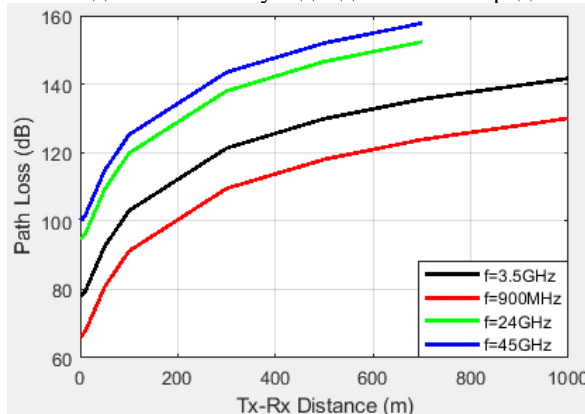


Рис. 2. Залежність втрат на шляху розповсюдження сигналу від відстані між передавачем і приймачем

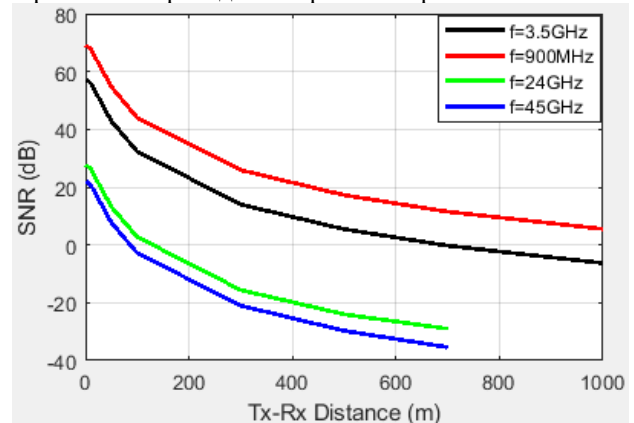


Рис. 3. Залежність середньоквадратичного значення шуму на приймачі від відстані між передавачем і приймачем

Визначимо параметри конфігурації каналу зв'язку для розрахунку SNR на елемент ресурсу (RE), отриманого з потужності передавача, шуму прийому, смуги пропускання і втрат на трасі. Середній сигнал, що приймається на RE, а також потужність приймальної антени і шуму на RE визначаються виразом:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 10 \lg(P_{Tx}) - 10 \lg(L) + 10 \lg\left(\frac{N_{FFT}}{12N_{grid}^{size}}\right) - 10 \lg(2N_0^2).$$

де P_{Tx} - загальна потужність на вході передаючої антенної решітки. N_{FFT} - Кількість точок швидкого перетворення Фур'є (FFT), що використовуються для модуляції OFDM. N_{grid}^{size} - Розмір сітки OFDM [5] в ресурсних блоках. L - Втрати на трасі. $\sqrt{2N_0}$ - Середньоквадратичне значення шуму на приймальну антену.

Приймання та вимірювання сигналу обумовлене наступними механізмами.. Мобільний абонент (UE) в моделі також оснащений антенною решіткою (з можливістю формувати та приймати направлені промені). На етапі початкового доступу UE виконує пошук комірки та синхронізацію. Модель UE повинна:

- приймати сигнал з різних напрямків: здійснюється власна розгортка променя. В результаті для кожної пари передавальний-приймальний промінь отримаємо оцінку потужності.
- скоригувати синхронізацію і демодуляцію: після вибору найкращого променя UE повинен виконати корекцію часу, OFDM-демодуляцію [7-9] та вилучити сигнали SSB.
- виміряти якість сигналу (RSRP/SINR): UE вимірює отриману потужність кожного SSB (або відповідного опорного сигналу) і на основі цих вимірів визначає найсильніший промінь.
- визначення найкращого променя: Отримавши виміри, UE обирає промінь з максимальною потужністю сигналу. Ця пара буде використана для подальшого обміну даними після встановлення зв'язку.

У 5G NR визначено три ключові процедури управління променем: P-1 – первинний пошук і вибір променя (SSB-based); P-2 – уточнення передавального променя (transmit-side CSI-RS-based); P-3 – уточнення приймального променя (receive-side CSI-RS-based), що схематично приведено на рис. 4.

Процедура 1 (P-1): SSB-Based Beam Sweeping, рис. 4, а.

Ця процедура фокусується на початковому захопленні на основі SSB для UE у режимі очікування. Під час початкового захоплення відбувається розгортка променя як на передавальному, так і на приймальному боці для вибору кращої пари променів на основі вимірів RSRP. В цілому, вибрані промені широкі і не можуть бути оптимальною парою променів передачі та прийому даних. Після з'єднання промені додатково уточнюються з використанням CSI-RS (для низхідної лінії зв'язку).

Для моделювання P-1 нам потрібно згенерувати пакет синхронізації. Наступний крок - сформувати промінь кожного з SSB в пакеті для охоплення як азимутального, так і вертикального напрямків і передати цей сигнал променем по просторовому каналу розсіювання.

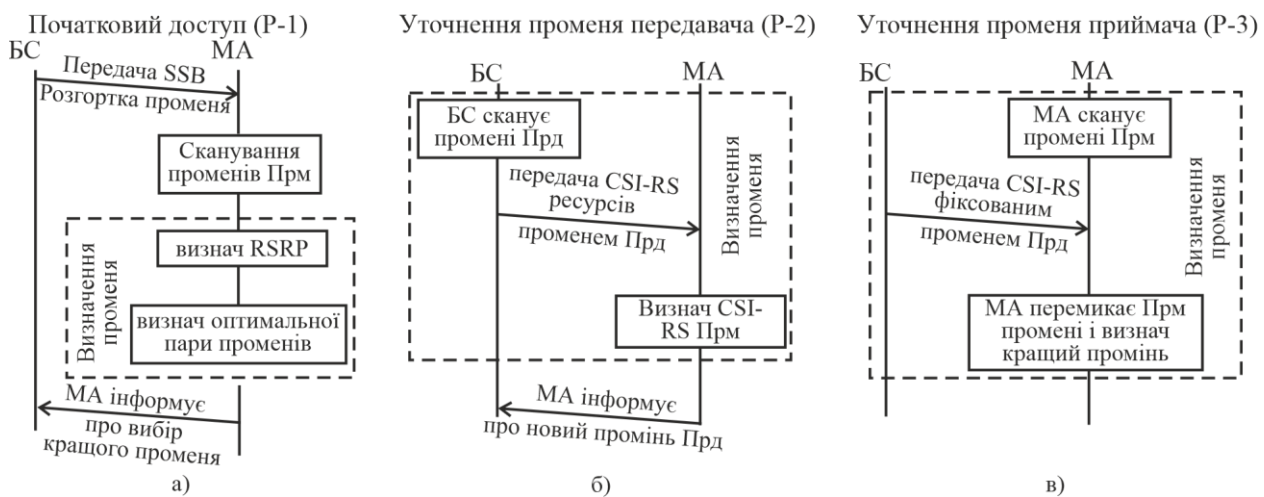


Рис. 4. Схематичне зображення процедур управління променем: а – процедура P-1; б – Процедура P-2; в – процедура P-3 (БС – базова станція; MA – мобільний абонент; Прд – передавач; Прм – приймач)

Конфігурація пакета сигналу синхронізації. Для початкового доступу періодичність SSB складає 20 мс. Розглянемо пакет сигналів синхронізації (SS). Блок первинного сигналу синхронізації займає 240 підносійних та 4 символи OFDM. Щоб досягти розгортки променя на передавальному кінці, необхідно сформувати промінь кожного з блоків SS у згенерованому пакеті. Для заданих блоків SS у пакеті та вказаних діапазонів розгортки необхідно визначити азимут та піднесення різних променів. Потім сформувати промінь окремих блоків у пакеті у кожному з цих напрямків і передати його просторовим каналом розсіювання. Спектрограма пакету сигналів синхронізації (SS) показано на рис. 5. На рис. 6 показано залежність RSRP від шуму (NocdBm).

У стандарті 5G три типи вимірювань опорного сигналу CSI-RS, включають:

- RSRP (Reference Signal Received Power) – потужність прийнятого опорного сигналу CSI – рис.6.
- RSSI (Received Signal Strength Indicator) – індикатор рівня прийнятого сигналу CSI – рис.7.
- RSRQ (Reference Signal Received Quality) – якість прийнятого опорного сигналу CSI – рис. 8.

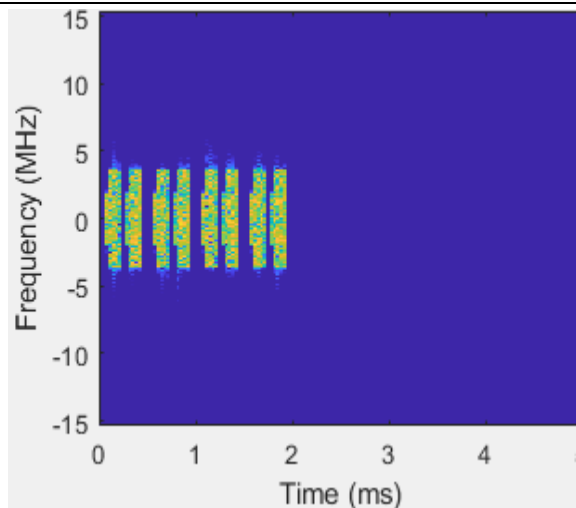


Рисунок 5. Генерація пакета SS у MATLAB

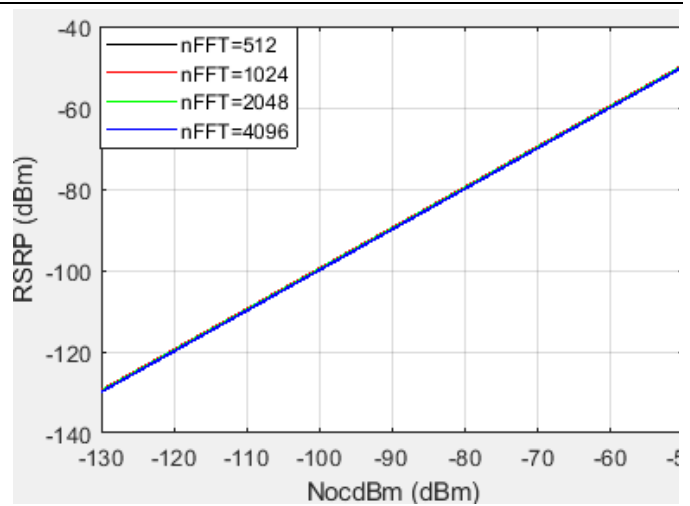


Рис. 6. Залежність RSRP від NcdBm

NcdBm - потужність завад від інших елементів і шум від інших джерел, що моделюється як адитивний білий гаусовий шум (AWGN) і вимірюється у децибелах на міліват.

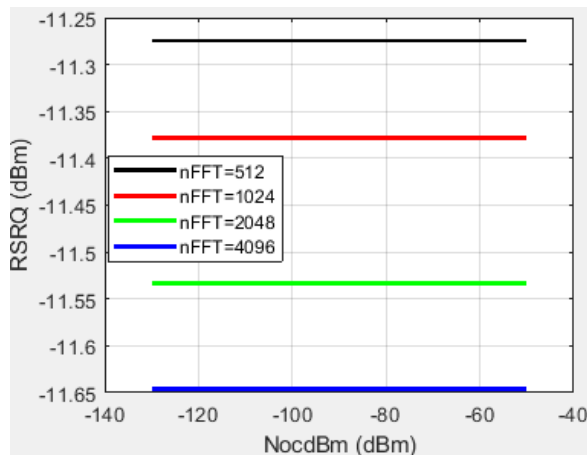


Рис. 7. Залежність RSRQ від NcdBm

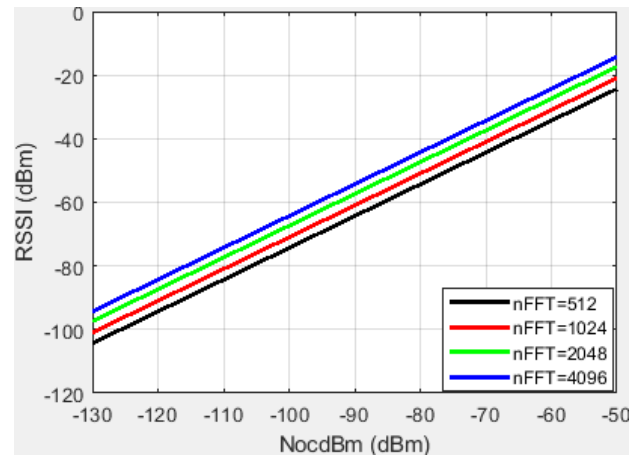


Рис. 8. Залежність RSSI від NcdBm

Залежність ширини променя від кількості антенних елементів приведена на рис. 9.

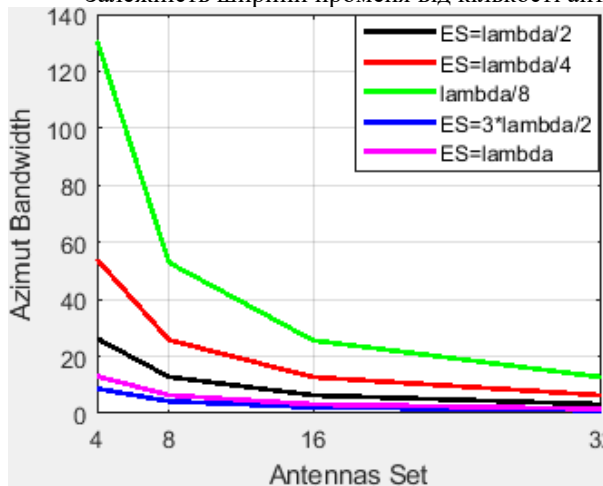


Рис. 9. Залежність ширини променя від кількості антенних елементів у антенній решітці

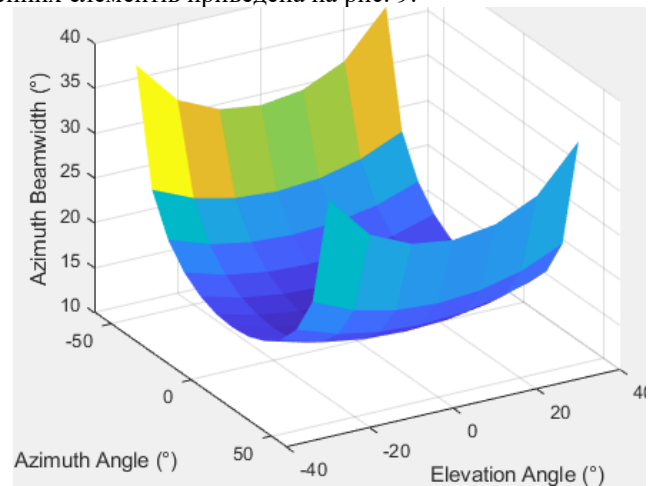


Рис. 10. Дослідження ширини променя від напрямку управління

Дослідження ширини променя від напрямку управління у тривимірній площині (рис. 10). Центральні кути променя у напрямку розповсюдження мають меншу ширину.

Залежність ширини променя від напрямку при різній кількості антен передавача приведена на рис. 11. та рис. 12.

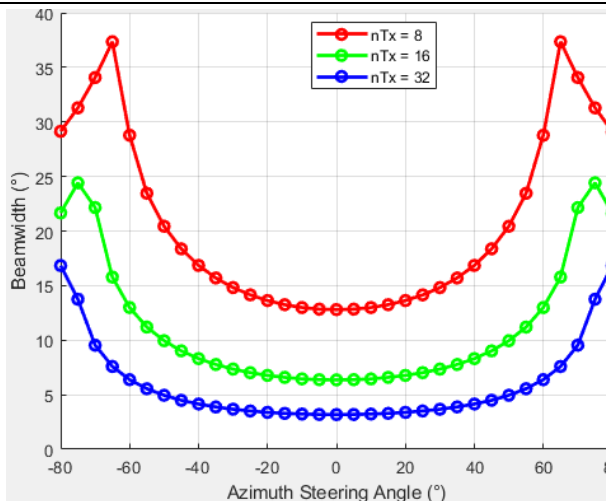


Рис. 11. Залежність ширини променя від напрямку при різних кількості антен передавача

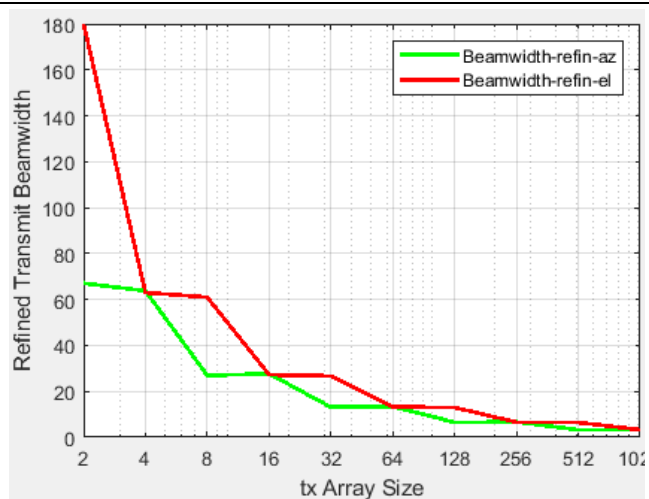


Рис. 12. Залежність уточненої ширини променя від кількості антен передавача

Процедура 2 (P-2), рис. 4, б: уточнення променя на боці передавача на основі CSI-RS. Після того, як початковий промінь встановлений, для отримання одноадресної передачі даних з високою спрямованістю і високим підсиленням потрібно промінь набагато тонший, ніж промінь SSB. Таким чином, набір ресурсів опорного сигналу налаштовується і передається в різних напрямках з використанням тонших променів в кутовому діапазоні променя початкового процесу захоплення.

На рис. 13 показаний сценарій 3D розсіювання MIMO [9], змодельований за допомогою MATLAB. Він включає діаграми спрямованості антенної решітки передавача та приймача, положення розсіювачів та їх шляху.

Процедура 3 (P-3), рис. 4, в: уточнення променя на боці приймача на основі CSI-RS.

P-3 фокусується на регулюванні променя на боці приймача з урахуванням поточного передаючого променя. Цей процес спрямований на пошук найкращого приймального променя, який може бути сусіднім або уточненим променем. Для цієї процедури набір ресурсів опорного сигналу (ненульової потужності CSI-RS для низхідного каналу і SRS для висхідного каналу) передається з тим же променем, а UE або gNB [5] приймає сигнал з використанням різних променів з різних напрямків, що охоплюють кутовий діапазон.

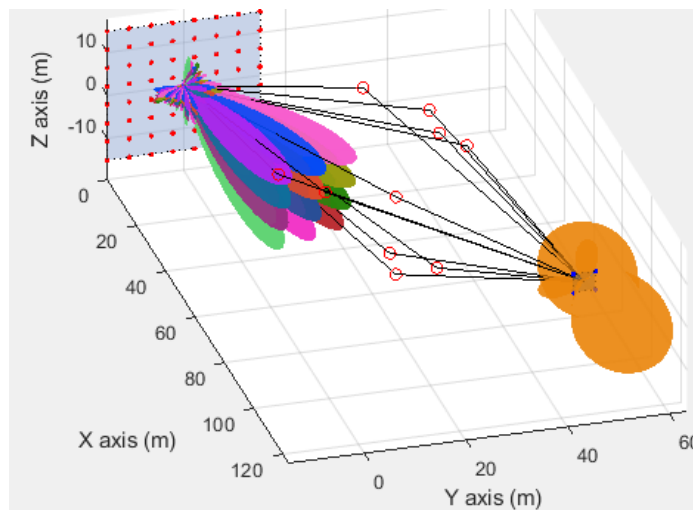


Рис. 13. Моделювання просторової сцени P-2 у MATLAB

Нарешті, найкращий приймальний промінь вибирається з урахуванням вимірювань RSRP всіх прийомних променів.

Висновки

В роботі проведено моделювання та дослідження процедур керування променями в системах мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G NR) у діапазоні міліметрових хвиль. Проаналізовано схеми обробки сигналів для процедур P-1 та P-2. Дослідження процедур Сканування променя та Визначення променя показало, що передача восьми SSB-блоків кожні 20 мс (одна повна розгортка на стороні gNB) потребує 160 мс для повної двобічної розгортки (8 Tx × 8 Rx), якщо UE змінює напрямок для кожного пакета SSB. Аналіз залежності втрат на шляху від відстані виявив, що при віддаленні між передавачем та приймачем на 700 м і зміні робочої частоти з 0,9 до 45 ГГц втрати на шляху зростають на 35 дБ. При цьому середньоквадратичне значення шуму на приймальній антені зменшується на 55 дБ. Дослідження залежності ширини променя від кількості елементів антенної решітки та міжелементного інтервалу показало, що збільшення кількості елементів і міжелементної відстані призводить до зменшення ширини променя. Зокрема, для URA з 32 елементами ширина променя

зменшується на 10° при збільшенні міжелементного інтервалу з $\lambda/8$ до $3\lambda/2$. Аналіз просторової залежності ширини променя у тривимірній площині виявив, що найменша ширина променя спостерігається у напрямку поширення хвилі (0°), тоді як на краях діапазону керування ($\pm 60^\circ$ по азимуту) спостерігається розширення променя через зростання рівня бічних пелюсток. Для площини підйому мінімальна ширина променя також відповідає напрямку (0°). При відхиленні до $\pm 60^\circ$ або $\pm 30^\circ$ ширина збільшується через перерозподіл енергії між основною та бічними пелюстками. Вертикальна ширина може бути більшою, що зумовлено меншою кількістю елементів у вертикальному напрямку решітки. Дослідження впливу кількості антен передавача на ширину променя та допустимий кут відстройки UE показало, що при збільшенні кількості елементів з 8 до 32 кут відстройки без зміни ширини променя може зростати від $\pm 15^\circ$ до $\pm 30^\circ$. Подальше збільшення кута призводить до експоненційного зростання ширини променя.

Література

1. Li, Y. -N. R., Gao, B., Zhang, X. & Huang, K. (2020). Beam Management in Millimeter-Wave Communications for 5G and Beyond. *IEEE Access*, 8, 13282-13293, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2963514.
2. Chatzoglou, E. & Goudos, S.K. (2023). Beam-Selection for 5G/B5G Networks Using Machine Learning: A Comparative Study. *Sensors*, 23, 2967, <https://doi.org/10.3390/s23062967>.
3. Xue, Q., Guo, J., Zhou, B., Xu, Y., Li, Z. & Ma, S. (2024). AI/ML for Beam Management in 5G-Advanced: A Standardization Perspective. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 19(4), 64-72, doi: 10.1109/MVT.2024.3431790.
4. Al-Hatim Y. M. & Al Janaby A. O. (2024). Artificial-Intelligence-Enhanced Beamforming for Power-Efficient User Targeting in 5G Networks using Reinforcement Learning. *International Journal of Computing and Digital Systems*, 16(1), 1083-1095. doi: 10.12785/ijcds/160179.
5. Boiko, J., Pyatin, I., & Eromenko, O. (2022). Analysis of signal synchronization conditions in 5G mobile information technologies. In *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2022)*, IEEE Press (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9766899>.
6. Пятін, І.С., Макаришкін, Д.А. & Мішан В.В. (2021). Дослідження процедури початкового доступу до мережі зв'язку п'ятого покоління. *Вісник Хмельницького національного університету*, 5, 141-149.
7. Park, J., Lee, E., Park, S., Raymond, S., Pyo, S. & Jo, H. (2019). Modeling and Analysis on Radio Interference of OFDM Waveforms for Coexistence Study. *IEEE Access*, 7, 35132-35147, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2896280.
8. Лужанський, В.І. & Макаришкін, Д.А. (2019). Дослідження діаграми направленості плоскої еквідистантної рівноамплітудної фазованої антенної решітки залежно від довжини електромагнітної хвилі, кількості випромінюючих елементів та відстані між ними. *Вісник Хмельницького національного університету*, 6, 161-167.
9. Boiko, J., Pyatin, I. & Eromenko, O. (2022). Signal Processing in the Synchronization System of Communication Channel with OFDM. In *Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, IEEE Press (14-18). doi: 10.1109/ATIT58178.2022.10024232.

References

1. Li, Y. -N. R., Gao, B., Zhang, X. & Huang, K. (2020). Beam Management in Millimeter-Wave Communications for 5G and Beyond. *IEEE Access*, 8, 13282-13293, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2963514.
2. Chatzoglou, E. & Goudos, S.K. (2023). Beam-Selection for 5G/B5G Networks Using Machine Learning: A Comparative Study. *Sensors*, 23, 2967, <https://doi.org/10.3390/s23062967>.
3. Xue Q. et. al. (2024). AI/ML for Beam Management in 5G-Advanced: A Standardization Perspective. arXiv:2309.10575.
4. Al-Hatim Y. M. & Al Janaby A. O. (2024). Artificial-Intelligence-Enhanced Beamforming for Power-Efficient User Targeting in 5G Networks using Reinforcement Learning. *International Journal of Computing and Digital Systems*, 16(1), 1083-1095. doi: 10.12785/ijcds/160179.
5. Boiko, J., Pyatin, I., & Eromenko, O. (2022). Analysis of signal synchronization conditions in 5G mobile information technologies. In *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2022)*, IEEE Press (pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9766899>.
6. Piatin, I.S., Makaryshkin, D.A. & Mishan V.V. (2021). Doslidzhennia protsedury pochatkovoho dostupu do merezhi zviazku piatoho pokolinnia. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, 5, 141-149.
7. Park, J., Lee, E., Park, S., Raymond, S., Pyo, S. & Jo, H. (2019). Modeling and Analysis on Radio Interference of OFDM Waveforms for Coexistence Study. *IEEE Access*, 7, 35132-35147, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2896280.
8. Luzhanskyi, V.I. & Makaryshkin, D.A. (2019). Doslidzhennia diahramy napravlennosti ploskoi ekvidystantnoi rivoamplitudnoi fazovanoi antennoi reshityky zalezno vid dovzhyny elektromahnitnoi khvyli, kilkosti vyprominiuyuchykh elementiv ta vidstani mizh nymy. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, 6, 161-167.
9. Boiko, J., Pyatin, I. & Eromenko, O. (2022). Signal Processing in the Synchronization System of Communication Channel with OFDM. In *Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, IEEE Press (pp. 14-18). doi: 10.1109/ATIT58178.2022.10024232.