

Проконець В.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Глоба Л.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОД МІЖСЕКТОРАЛЬНОГО ПЕРЕРОЗПОДІЛУ КОРИСТУВАЧІВ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

Стаття присвячена викладу результатів математичного моделювання процесу перерозподілу користувачів між секторами базових станцій, що обслуговують високонавантажену ділянку мережі. Результати моделювання показують, що з використанням методу пошуку за сіткою (grid search) для параметрів потужності випромінювання можна досягнути рівномірного розподілу користувачів між секторами при довільному розподілі користувачів на місцевості. Основними недоліками сучасних підходів, що орієнтуються на задачу оптимізації мереж 4G/5G є концентрація на забезпеченні оптимального покриття та балансування навантаження всередині сектору шляхом рівномірного розподілу наявних частотних та часових ресурсів. У ситуації, коли один з сусідніх секторів є перенавантаженим, а інший має достатньо вільного ресурсу, доцільним є виконання перерозподілу користувачів шляхом зміни території покриття кожного сектору.

Запропонований в статті метод міжсекторального розподілу користувачів базується на використанні технології цифрового двійника (digital twin). Основною метою використання цифрових двійників є досягнення більшого рівня взаємодії фізичних об'єктів (в даному випадку – елементів радіомережі стільникового зв'язку) та їхніх цифрових репрезентацій. Цифрова репрезентація може отримувати від фізичного об'єкта дані щодо його функціонування в режимі реального часу, проводити моделювання та прогнозування на основі отриманих даних. На основі прогнозів може бути прийнято рішення щодо зміни певних параметрів фізичного об'єкта.

Радіомережа стільникового зв'язку, модернізована запропонованим методом, може в автоматичному режимі отримувати рекомендації щодо зміни потужності випромінювання сусідніх секторів високонавантаженої ділянки, що позитивно вплине на показники якості обслуговування.

Напрямо подальших досліджень слід вважати його інтеграцію в комплексну систему цифрового двійника радіомережі стільникового зв'язку та роботу над методом, що дозволить отримати дані щодо щільності розподілу користувачів на місцевості з високою роздільною здатністю. Наявна імплементація методу допускає, що розподіл користувачів всередині сектору є рівномірним.

Ключові слова: математичне моделювання радіомережі, оптимізація радіомережі, ємність мережі, перерозподіл користувачів, цифровий двійник.

Постановка проблеми. Нині планування та оптимізація радіомережі стільникового зв'язку є ключовим етапом розгортання бездротових систем зв'язку, що забезпечують покриття в масштабах цілої країни. В рамках планування необхідно вирішити дві основні задачі: забезпечення максимально можливого покриття та забезпечення необхідної ємності на цій ділянці. Оптимізацію радіомережі можна розділити на два окремих підзавдання: усунення помилок, допущених при плануванні мережі та реакція на еволюцію мережі протягом часу – збільшення кількості користувачів, переміщення значної кількості користувачів в іншу ділянку мережі. Таким чином, актуальним

питанням є можливість автоматичної та адаптивної реконфігурації мережі у відповідь на зміни в мережі, описані вище.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним предметом оглядової статті [1] є самоорганізовані мережі – Self-Organized Network (SON). Автори наводять три категорії таких мереж:

- Конфігураційні (self-configuration), призначені для вводу в експлуатацію нового елемента мережі при мінімальному втручанні людини в цей процес;
- Оптимізаційні (self-optimization), що в автономному режимі виконують оптимізацію параметрів системи після початкової само-конфігурації;

- Відновлювальні (self-healing), призначені для зменшення кількості відмов у обслуговуванні шляхом виконання відповідних дій щодо відновлення.

В рамках вирішення проблем визначених в цій статті, доцільним є використання оптимізаційних само-організованих мереж. Серед задач таких мереж в стандарті 3GPP Rel.10 для мереж LTE була визначена оптимізація покриття-ємність – Coverage-Capacity Optimization (CCO). В роботі [2] автори розглядають декілька підходів щодо CCO: [3], [4], [5], [6]. При цьому, [3], [5], [6] зазначають, що основною метою їхніх підходів є оптимізація саме покриття, а зміни ємності фактично є наслідками зміни покриття. Автори [4] фокусуються на оптимізації ємності шляхом зміни електричного куту нахилу антен, проте основним недоліком цього дослідження є визначення проблемних секторів за сумарним об'ємом ресурсів, споживаних користувачами. На нашу думку, цей показник не є найбільш релевантним, оскільки цей ресурс можуть споживати як декілька користувачів так і декілька десятків. У першому випадку зміна куту нахилу антен з великою ймовірністю не принесе покращення. В статті [7] автори визначають можливість оптимізації покриття та ємності шляхом зміни електричного куту нахилу антени, проте, як і в роботах [3], [5], [6] фокусуються на оптимізації покриття. Оптимізація ємності досягається шляхом зменшення загального рівня інтерференцій, що не відповідає проблемі, зазначеній у цій статті.

Постановка завдання. Існуючі методи оптимізації покриття-ємність в технології SON більшою мірою призначені саме для оптимізації покриття та рівня інтерференції між сусідніми секторами. Метод запропонований авторами в [4] найбільше підходить для вирішення задачі перерозподілу користувачів між секторами, проте містить деякі недоліки. Таким чином, вирішити задачу перероз-

поділу користувачів можна з допомогою покращеного методу, базованого на технології цифрового двійника, викладенню якого і присвячена ця стаття.

Вирішення проблеми.

В цьому дослідженні для вирішення задачі пропонується використання технології цифрового двійника, основною метою якої є створення цифрової моделі певного фізичного об'єкту чи процесу, що є інтегрованою з цим самим об'єктом чи процесом двостороннім зв'язком. Рис.1 відображає основні відмінності цифрового двійника від стандартної цифрової моделі.

Таким чином, можна зробити висновок, що цифровий двійник отримує від фізичної системи дані щодо її функціонування, в той час, як цифровий двійник може виконувати керування системою на основі аналізу цих даних та прогнозування стану системи в майбутньому шляхом симуляції.

В контексті планування та оптимізації радіомережі стільникового зв'язку, варто виокремити основні фази, до яких відносять:

- Попереднє планування, в якому визначається загальний вектор розвитку мережі та необхідна кількість обладнання;
- Детальне планування, в якому визначаються конкретні локації розташування базових станцій та їхній початковий набір конфігураційних параметрів;
- Оптимізація, метою якої, як було зазначено вище, є усунення помилок, допущених при плануванні мережі та реакція на еволюцію мережі протягом часу.

В цьому випадку, цифровий двійник є високорівневою імітацією мережі на місцевості, основними елементами якої є:

- Світ (набір тривимірних точок формату довгота-широта-висота над рівнем моря), для яких розглядаються рівень покриття та кількості корис-



Рис. 1. Відмінності цифрового двійника від стандартної цифрової моделі

тувачів. На відміну від статистичного параметру сумарного об'єму ресурсів, споживаних користувачами, що використовується в дослідженні [4], нами запропоновано використовувати параметр загальної кількості користувачів, оскільки він є більш релевантним для задачі перерозподілу користувачів між секторами базової станції.

- Набір базових станцій з відповідними конфігураційними параметрами.

Цифровий двійник замінює собою фазу оптимізації радіомережі, оскільки він виконує функції моніторингу статистичних параметрів функціонування, аналізу цих даних з метою виявлення проблемних секторів, симуляцію можливих рішень, одне з яких є предметом цієї статті, та надання рекомендацій щодо найкращого рішення для кожного проблемного сектору. Інтеграція цифрового двійника в процеси планування та оптимізації радіомережі зображена на рис. 2.

До рішень, що можуть бути рекомендовані цифровим двійником відносяться:

- Виділення неактивного ресурсу. У випадку використання обмеженого частотного ресурсу (активні не всі несучі / ресурсні блоки) можна його розширити до максимально можливого;

- **Зміна розподілу користувачів між сусідніми секторами.** З цією метою Цифровий двійник може виконувати поетапну зміну параметрів мережі (такі як потужність випромінювання та електричний кут нахилу антен) та проводити симуляцію розподілу користувачів при новому покритті. Така зміна доцільна у випадку, коли один сектор є перенавантаженою, а сусідній – недонавантаженою. Основною задачею є рівномірний розподіл користувачів між сусідніми секторами;

- Інсталяція багатопромених антен;
- Будівництво нової базової станції.

Основою відмінністю нового методу міжсекторального перерозподілу користувачів є те, що він є складовою цифрового двійника радіомережі. Це означає, що він може використовувати статистичні показники функціонування радіомережі як вхідні дані в режимі реального часу, а також основні елементи цифрового двійника описані вище: світ та набір базових станцій з їхніми конфігураціями.

Маємо зону високого навантаження та множини секторів базових станцій, що її обслуговують. Визначимо значення кількості користувачів в секторі, актуальні параметри потужності та електричного куту нахилу антен та площі покриття як:

$$X = (x_i), P = (p_i), A = (a_i), S = (s_i), I = \overline{1, n}$$

де n – кількість сусідніх секторів в зоні високого навантаження.

Визначимо множину допустимих значень потужності випромінювання та допустимих значень куту нахилу антен:

$$PP = (pp_j), J = \overline{1, m} \quad AP = (ap_y), Y = \overline{1, k}$$

де m, k – кількість допустимих значень потужності випромінювання та куту нахилу антен відповідно.

Таким чином, необхідно знайти значення потужності випромінювання та куту нахилу антен всіх сусідніх секторів в зоні високого навантаження, що забезпечать рівномірний розподіл користувачів між секторами:

$$(p_i, a_i), \forall i \in I, \sum_{\substack{0 \leq j \leq n \\ 0 < j < n}} \frac{s_{ji}}{s_i} * x_i \approx \frac{\sum x}{n}$$

де s_i – площа покриття сектору i , s_{ij} – площа пересічення покриття реконфігурованого сектору j з оригінальним покриттям сектору i .

Імплементація запропонованого методу створена у вигляді програми Python. Програма містить два основні класи:

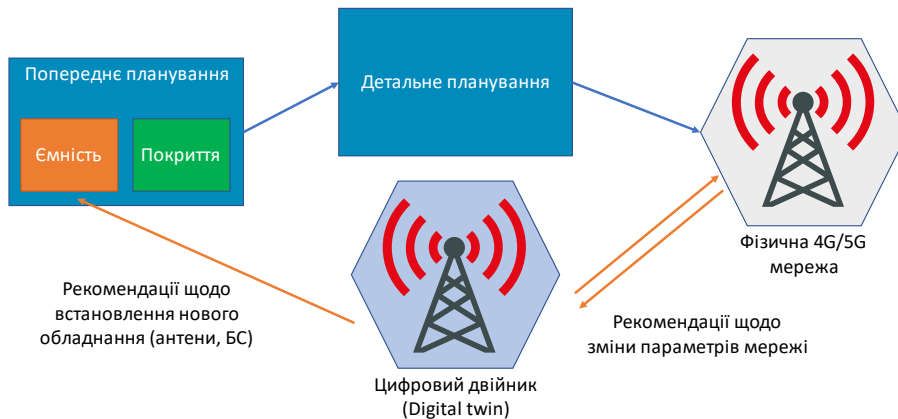


Рис. 2. Інтеграція цифрового двійника радіомережі в процеси планування та оптимізації

- World – визначає основний елемент «Світ» цифрового двійника радіомережі. Містить набір тривимірних точок у просторі з дискретизацією 5м. Функція, що реалізує запропонований у статті метод є складовою частиною цього класу;

- Transmitter – визначає об’єкти основного елементу «Набір базових станцій» цифрового двійника радіомережі. Містить набір конфігураційних параметрів базової станції, а також функції розрахунку втрат на трасі (path loss) та рівня отриманого сигналу в будь-якій точці простору від конкретної базової станції. Також створений інтерфейс, що дозволяє зберігати статистичні дані функціонування, що спростить інтеграцію методу з реальною мережею.

Програма має наступні допущення та обмеження:

- Розрахунок покриття може відбуватися лише в точках, визначених в класі World;

- Відповідно, покриття кожної базової станції визначається множиною точок, що їй належить;

- В цьому дослідженні розподіл користувачів всередині множини точок, що належать базовій станції вважається рівномірним. Наприклад, якщо внаслідок реконфігурації 10% покриття базової станції 1 (BC-1) перейшло до базової станції 2 (BC-2), то, відповідно, 10% користувачів також перейшло від BC-1 до BC-2.

- Втрати на трасі попередньо розраховані та збережені в форматі JSON для всіх можливих значень параметрів типу місцевості (сільська, міська), наявності прямої видимості, частоти, висоти базової станції, відстані до базової станції. Всі розрахунки виконані згідно специфікації 3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16 [8]. При розрахунку покриття зчитується відповідне значення втрат на трасі замість окремого розрахунку, що дозволило пришвидшити розрахунок покриття однієї базової станції в 23 рази (з 2,3с до 0,1с). В рамках функціонування цифрового двій-

нику дане рішення є важливим, оскільки дозволяє виконувати розрахунки в режимі реального часу з мінімальними затримками.

Для перевірки запропонованого методу було проведено математичне моделювання простого запропонованого методу для цифрового двійника, що складається з плоского світу (для всіх точок висота над рівнем моря складає 0 м) та двох секторів, що знаходяться на відстані 6 км та направлені один навпроти іншого. При цьому в секторі 1 знаходяться 60 користувачів, а в секторі 2 – 20. Програма виконує поетапну симуляцію із зміною потужності випромінювання кожної базової станції за стратегією пошуку по сітці. При цьому, автоматично визначається напрям переходу користувачів від більш навантаженого сектору. Діапазон зміни потужності складає (-1 дБ...-5 дБ) для більш навантаженого сектору та (1 дБ ... 5 дБ) для менш навантаженого з кроком 1 дБ. У зв’язку з малою кількістю можливих комбінацій та значною швидкістю розрахунків, використання алгоритмів штучного інтелекту є недоцільним на даному етапі.

Для даного прикладу найкращою комбінацією буде зменшення потужності на 2 дБ для сектору 1 та збільшення на 1 дБ потужності випромінювання сектору 2. При цьому, очікувані значення кількості користувачів складатимуть 39.84 та 40.16 для секторів 1 та 2 відповідно. Зміна розподілу покриття відображена на рис. 3. Зміна рівню отриманого сигналу відображена на рис. 4.

Висновки.

1. У статті запропоновано метод міжсекторального розподілу користувачів на базі технології цифрового двійника, що дозволяє рівномірно розподілити користувачів між сусідніми секторами, що обслуговують високонавантаженою ділянкою мережі. Основною відмінністю від існуючих методів є фокус на показнику кількості користувачів та врахуванні унікального для кожного

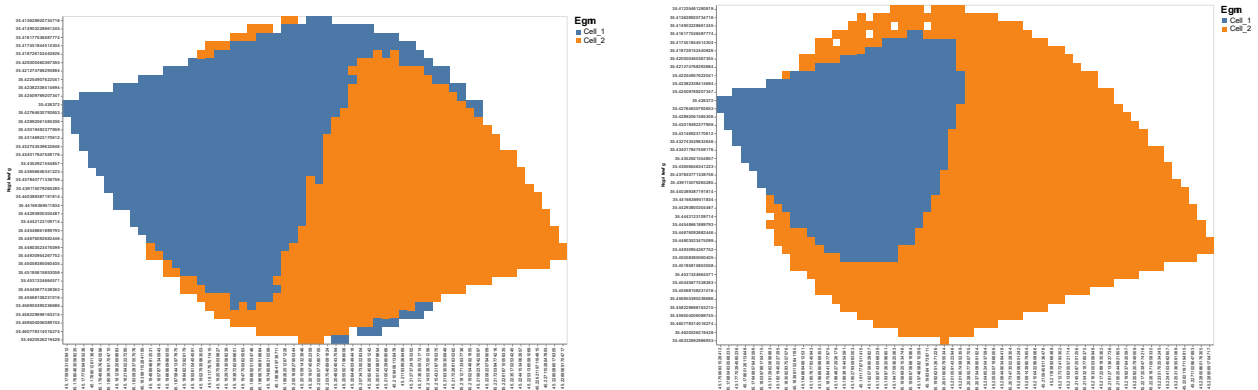


Рис. 3. Зміна покриття секторів 1 (синій колір) та 2 (помаранчевий колір) внаслідок реконфігурації секторів за параметрами, що були запропоновані новим методом міжсекторального перерозподілу користувачів

сектору базової станції розподілу користувачів. На даному етапі такий розподіл вважається рівномірним.

2. Проведено математичне моделювання простого цифрового двійника радіомережі стільникового зв'язку, що містить імплементацію запропонованого методу. Результати моделювання показують, що метод має високу ефективність рівномірного розподілу користувачів між сусідніми секторами. При цьому, використання набору

географічних точок з прив'язаною кількістю користувачів дозволяє використовувати метод для довільного розподілу користувачів.

3. Напрямом подальших досліджень слід вважати його інтеграцію в комплексну систему цифрового двійника радіомережі стільникового зв'язку та роботу над методом, що дозволить отримати дані щодо щільності розподілу користувачів на місцевості з високою роздільною здатністю.

Список літератури:

1. Hasna Fourati, Rihab Maaloul, Lamia Chaari, Mohamed Jmaiel, Comprehensive survey on self-organizing cellular network approaches applied to 5G networks, *Computer Networks*, Volume 199, 2021, 108435, ISSN 1389-1286 <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108435>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128621003960>)
2. Jessica Moysen, Lorenza Giupponi, From 4G to 5G: Self-organized network management meets machine learning, *Computer Communications*, Volume 129, 2018, Pages 248-268, ISSN 0140-3664, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2018.07.015>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366418300380>)
3. Sengul, Cigdem. (2014). Self-optimization of coverage and capacity based on a fuzzy neural network with cooperative reinforcement learning. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*.
4. S. Klein, I. Karla and E. Kuhn, "Potential of INTRA-LTE, Intra-Frequency Load Balancing," 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Budapest, Hungary, 2011, pp. 1-5, doi: 10.1109/VETECS.2011.5956281.
5. Li, Jingyu & Zeng, Jie & Su, Xin & Luo, Wei & Wang, Jing. (2012). Self-Optimization of Coverage and Capacity in LTE Networks Based on Central Control and Decentralized Fuzzy Q-Learning. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2012. 10.1155/2012/878595.
6. C. Yanyun, H. Alexis, X. Hui and Y. Xingxiu, "Coverage and Capacity Optimization for 4G LTE Networks Using Differential Evolution," 2018 5th IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems (CCIS), Nanjing, China, 2018, pp. 640-645, doi: 10.1109/CCIS.2018.8691195.
7. Dandanov, Nikolay & Al-Shatri, Hussein & Klein, Anja & Poulkov, Vladimir. (2017). Dynamic Self-Optimization of the Antenna Tilt for Best Trade-off Between Coverage and Capacity in Mobile Networks. *Wireless Personal Communications*. 92. 10.1007/s11277-016-3849-9.
8. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16). https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/138900_138999/138901/16.01.00_60/tr_138901v160100p.pdf

Prokopets V.A., Globa L.S. METHOD OF INTERSECTORAL REDISTRIBUTION OF USERS BASED ON DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

The article is devoted to presenting the results of mathematical modeling of the process of redistribution of users between sectors of base stations serving a highly loaded section of the network. The simulation results show that using the grid search method for radiation power parameters makes it possible to achieve an even distribution of users between sectors with an arbitrary distribution of users on the terrain. The main disadvantages of modern approaches focused on optimizing 4G/5G networks are the concentration on ensuring optimal coverage and balancing the load within the sector through the uniform distribution of available frequency and time resources. When one of the adjacent sectors is overloaded and the other has enough free resources, it is reasonable to redistribute users by changing the coverage areas of each sector. The method of intersectoral distribution of users proposed in the article is based on digital twin technology. The primary purpose of using digital twin is to achieve a higher level of interaction between physical objects (in this case - elements of the cellular radio network) and their digital representations. Digital representation can receive data from a physical object regarding its functioning in real-time and conduct modeling and forecasting based on the received data. Based on forecasts, a decision can be made to change specific parameters of a physical object.

Modernized by the proposed method, the cellular radio network can automatically receive recommendations for changing the radiation power of neighboring sectors of a highly loaded area, which will positively affect service quality indicators.

The direction of further research should be its integration into a complex system of a digital twin of the cellular radio network and work on a method that will allow obtaining data on the density of the distribution of users in the area with high resolution. The existing implementation of the method assumes that the distribution of users within the sector is uniform.

Key words: *mathematical modeling of the radio network, optimization of the radio network, network capacity, redistribution of users, digital twin.*