

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2021-43-07>

УДК 621.396

Кокіза Сергій Вікторович, науковий співробітник

<https://orcid.org/0000-0001-8111-9203>

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз СБ України

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МНОЖИННОГО НЕОРТОГОНАЛЬНОГО ДОСТУПУ У МЕРЕЖІ 5G

### Кокіза С. В. Моделювання системи забезпечення множинного неортогонального доступу у мережі 5G

Розглянуто принципи організації систем захисту процесу передачі даних у глобальних інформаційних мережах на базі інтерфейсу неортогонального множинного доступу. Запропонована математична модель побудови телекомунікаційної мережі організованої відповідно до стандарту 5G, у рамках якої інформаційні вузли користувачі та зловмисників розташовані випадковим чином. Оцінка ефективності стратегії запобігання витокам «чутливих даних» було модифіковано асимптотичні рівняння ймовірності збою системи захисту. Система оцінки надійності передачі даних базується на статистичних даних поточного співвідношення сигналу до суми шуму і інтерференції сигналів та поточного співвідношення сигналу до шуму для користувачів сервісу, а також сторонніх осіб з неавторизованим доступом до мережевого ресурсу.

**Ключові слова:** стандарт зв'язку 5G, телекомунікаційна мережа, множинний неортогональний доступ, математична модель, асимптотичні рівності, математична модель.

### Кокіза С. В. Моделирование системы обеспечения множественного неортогонального доступа в сети 5G.

Рассмотрены принципы организации систем защиты процесса передачи данных в глобальных информационных сетях на базе интерфейса неортогонального множественного доступа. Предложенная математическая модель построения телекоммуникационной сети, организованной в соответствии со стандартом 5G, в рамках которой информационные узлы пользователей которой и злоумышленников расположены случайным образом. Для оценки эффективности стратегии предотвращения утечки «чувствительных данных» были модифицированы асимптотические уравнения вероятности сбоя системы защиты. Система оценки надежности передачи данных базируется на статистических данных текущего соотношения сигнала к сумме шума и интерференции сигналов и текущего соотношения сигнала к шуму для пользователей сервиса, а также посторонних лиц с неавторизованным доступом к сетевому ресурсу.

**Ключевые слова:** стандарт связи 5G, телекоммуникационная сеть, множественный неортогональный доступ, математическая модель, асимптотические равенства, математическая модель.

**Kokiza Sergii. Modeling of the system for providing non-orthogonal multiple access in a 5G network.** The principles of organizing systems for protecting the data transmission process in global information networks based on a non-orthogonal multiple access interface are considered. The proposed mathematical model for building a telecommunications network organized in accordance with the 5G standard, where the information nodes of users and attackers are randomly located. To assess the effectiveness of the strategy to prevent the leakage of "sensitive data", the asymptotic equations of the protection system failure probability were modified. The system for assessing the reliability of data transmission is based on statistical data of the current signal-to-noise ratio and signal interference and the current signal-to-noise ratio for service users, as well as persons with unauthorized access to a network resource.

**Key words:** 5G communication standard, telecommunication network, non-orthogonal multiple access, mathematical model, asymptotic equalities, mathematical model.

**Вступ.** Активний розвиток сучасних телекомунікаційних мереж (Telecommunications Network, TCN) надав можливість значним чином розширити функціонал мережевих сервісів, але й, водночас, призвів до експоненційного росту вимог на масштабованість апаратно-програмного комплексу інфраструктури TCN. Вимога на масштабованість у першу чергу пов'язана з розширенням інформаційних вузлів мережу, що відповідають кінцевим користувачам та актуальністю впровадження множинного доступу (Multiple Access, MA). На етапі впровадження стандарту 5G зазначений ріст кількості кінцевих користувачів значною мірою полягає у появі автоматизованих платформ і програмних додатків, що взаємодіють з TCN на рівні «машина-машина» (Machine-to-Machine, M2M). M2M-взаємодія є основою сучасної парадигми «Інтернету всього» (Internet of Everything, IoE), як набору концепцій «Інтернету речей» (Internet of Things, IoT), «Інтернету транспортних засобів» (Internet of Vehicles, IoV), тощо — що вказує на *актуальність дослідження* по оптимізації MA-інтерфейсів.

У рамках стандарту 5G активно використовується інтерфейс неортогонального множинного доступу (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), що характеризується високими показниками ефективності перепускності (Spectral Efficiency, SE), що визначає швидкість передачі потоку даних у рамках заданої смуги інформаційного каналу та протоколу зв'язку [1-5]. Однією з базових переваг NOMA є високий ступінь інтегрованості з іншими MA-інтерфейсами оскільки концепція NOMA базується на застосуванні домену з кількома рівнями потужності (Power Domain, PA). У рамках

зазначеного підходу один функціональний блок розподіляє апаратний і програмний ресурс TCN між декількома користувачами мережевого сервісу.

**Аналіз сучасних досліджень і публікацій** присвячених проблемам організації та оптимізації систем TCN на базі NOMA-інтерфейсу вказує на необхідність побудови універсальної математичної моделі множинного доступу до мережі 5G[2-5]. У рамках даного дослідження було запропоновано розглянути наступні підходи організації процесу передачі даних на базі NOMA-інтерфейсу: модель низхідної лінії зв'язку NOMA (DownLink, DL-NOMA) з випадковим розподілом інформаційних вузлів кінцевих користувачів сервісу[6, 7]; протокол розподілу мережевого ресурсу при спільному використанні NOMA-інтерфейсу (Cooperative Simultaneous Wireless Power Transfer, CSWPT), що базується на математичній моделі енергоспоживання [8, 9]; схема «справедливого розподілу» (UserFairnessScheme, UFS), що надає можливість оптимізувати модель NOMA-інтерфейсу відповідно рівномірності розподілу мережевого ресурсу між інформаційними вузлами кінцевих користувачів [10, 11]; модель масштабованої когнітивної мережі (Large-Scale Cognitive Networks, LSCN), що базується на розподілі інформаційних вузлів відповідно стохастичної мережі [12, 13]; методика впровадження множинних вузлів прийому-передачі даних (MultipleAntennas Technologies, MAT), що додатково розширює функціональні можливості NOMA-інтерфейсу[14-18], як то впровадження системи «множинний вхід — одиночний вихід» (Multiple Input Single Output) та «множинний вхід — множинний вихід» (Multiple Input Multiple Output) як для низхідної, так і для висхідної лінії зв'язку.

Проведений аналіз вказує на необхідність уніфікації представлених підходів з метою побудови цілісної методології організації, оцінки та оптимізації NOMA-інтерфейсу мереж стандарту 5G, що розглядається як **невирішена частина загального дослідження**.

Таким чином, метою даної роботи стала побудова універсальної математичної моделі функціонування NOMA-інтерфейсу та формування на її основі методологічних рекомендацій по оптимізації інфраструктури інформаційної мережі, організованої згідно стандарту 5G.

**Основна частина дослідження.** Для постановки задачі математичного моделювання розглянемо узагальнену схему організації TCN, що складається з наступних інформаційних вузлів:

- $B_m$  — один з вузлів базової станції (Base Station, BS), де  $m \in [1; M]$ ;
- множина  $EU: \{EU_i\}$  (де  $i \in [1; I]$ ) вузлів кінцевих користувачів сервісу (End Users, EU), що передають блоки даних через NOMA-інтерфейс;
- множина  $NE: \{NE_j\}$  (де  $j \in [1; J]$ ) вузлів представників сторони, що намагається здійснити неавторизований доступ до даних користувачів (Network Eavesdropper, NE), але при цьому зі свого боку не вносить змін у блоки даних.

Розглянемо геометрію мережевою моделі як набір концентричних кілець з центром у положенні BS, що визначаються відповідно радіусу  $R_{PA}$ ,  $R_{NA}$  і  $R_{MA}$  (рис. 2):

- захищена зона мережі (Protected Area, PA), у якій знаходиться BS і частина EU, але відсутні NE, що визначається радіусом  $R \in [0; R_{PA}]$ ;
- зона множинного доступу користувачів сервісу, у якій знаходяться EU і NE, що визначається радіусом  $R \in (R_{PA}; R_{NA}]$ ;
- зона моніторингу (Monitoring Area, MA) поза зони охоплення BS, у якій знаходяться тільки NE, що визначається радіусом  $R \in (R_{NA}; R_{MA}]$ .

Просторова топологія розташування NE моделюється з використанням однорідного пуассонівського процесу  $\Phi_{NE}$  з густиною  $\lambda_{NE}$ . У свою чергу, інформаційні канали моделюються через квазістатичне затухання Релея (коефіцієнти каналу є фіксованими в рамках окремого каналу передачі даних). У якості прикладу розглянемо наступне ранжування рівня підсилення каналів  $n \in [1; N]$  на основі величини  $G_n$ :

$$(G_1)^2 \leq \dots \leq (G_n)^2 \leq \dots \leq (G_{n+\Delta n})^2 \leq \dots \leq (G_N)^2. \quad (1)$$

Рівень підсилення каналу обернено пропорційний рівню втрат, тому у рамках NOMA-інтерфейсу користувача з великими малим  $G$  ( $n \rightarrow N$  і  $n \rightarrow 1$ , відповідно). Відповідно коефіцієнт розподілу потужності передачі даних () має відповідати наступним умовам:

$$\begin{cases} \alpha_n \geq \alpha_{n+\Delta n} \\ \alpha_n + \alpha_{n+\Delta n} = 1 \end{cases} \quad (2)$$

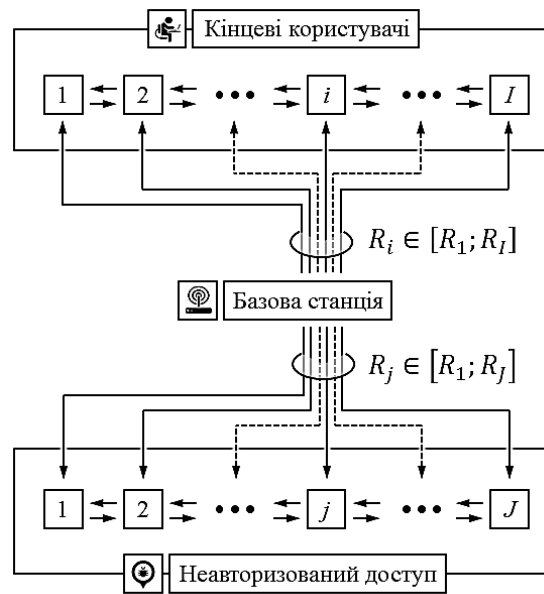


Рис. 1. Базова модель організації інформаційних вузлів мережі відповідно інтерфейсу NOMA.

Методика послідовного зменшення рівня завад (Successive Interference Cancellation, SIC) у рамках NOMA-інтерфейсу керується вузлом користувача  $(n + \Delta n)$ . Згідно зі вказаними припущеннями функція, що визначає поточне співвідношення сигналу до суми шуму і інтерференції сигналів (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR) для користувача  $(n)$  та функція, що визначає поточне співвідношення сигналу до шуму (Signal-to-Noise Ratio, SNR) для користувача  $(n + \Delta n)$  можуть бути визначені через наступні співвідношення:

$$\begin{cases} \eta_{SINR}(n|n + \Delta n) = \frac{\alpha_n \cdot (G_n)^2}{\alpha_{n+\Delta n} \cdot (G_n)^2 + 1/\rho_{EU}}, \text{ де } \eta_{EU} = \frac{P_{BS}}{(\sigma_{EU})^2} \cdot \\ \eta_{SNR}(n + \Delta n|n) = \eta_{EU} \cdot \alpha_{n+\Delta n} \cdot (G_{n+\Delta n})^2 \end{cases} \quad (3)$$

Відповідно представленого математичного апарату  $\eta_{EU}$  — SNR передачі сигналу,  $P_{BS}$  потужність передачі сигналу на рівні BS, а  $(\sigma_{EU})^2$  — дисперсія адитивного білого гаусова шуму (Additive White Gaussian Noise, AWGN) на рівні EU. Умова надійного відтворення блоку даних на рівні користувача  $(n)$ , що передається користувачем  $(n + \Delta n)$  вводиться наступна умова:

$$\alpha_n \geq (2^{R_n} - 1) \cdot \alpha_{n+\Delta n}, \quad (4)$$

де  $R_n$  — відстань між BS і EU $(n)$ . Крім того, у схему має бути включена модель обмежених втрат (Bounded Path Loss Model, BPL-модель).

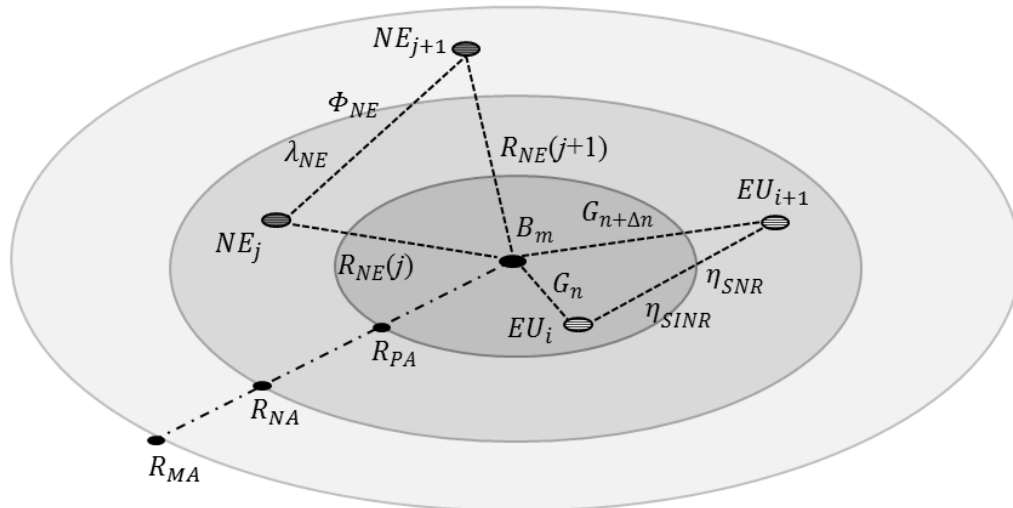


Рис. 2. Схема розрахунку показників передачі даних між рівнями BS, EU і NE.

У глобальних та локальних TCN великого масштабу NE можуть бути ефективно виявлені на основі інформації про канал зв'язку (Channel State Information, CSI). Так, через аналіз поточного показника співвідношення сигналу до шуму від NE при взаємодії користувача  $(n + \Delta n)$  і  $(n)$  критерій наявності у мережі NE виражається через відстань між BS та відповідним інформаційним вузлом  $NE_j$  та пов'язані з цим втрати шляху (обернено пропорційні до  $(R_{NE})^{\alpha_j}$ ) наступним чином:

$$\eta_{NE}(NE_j) = \eta_{NE} \cdot \alpha_j \cdot \max_{NE_j \in \Phi_{NE}} \left\{ \frac{(\varphi_{NE})^2}{(R_{NE})^{\alpha_j}} \right\} \text{ при } R_{NE} \in (R_{PA}; R_{NA}], \quad (5)$$

де  $\varphi_{NE} \in \{0; 1\}$  — коефіцієнт згасання. Таким чином, ефективність детектування NE прямо пропорційна величині  $R_{NE}$ .

На основі значень  $\eta_{SINR}(n|n + \Delta n)$  і  $\eta_{SINR}(n + \Delta n|n)$  для  $n \in [1; N]$ , а також  $\eta_{NE}(NE_j)$  для  $j \in [1; J]$  базується надійність передачі даних між вузлами кінцевих користувачів, а також захист «чутливих» даних користувачів сервісу від несанкціонованого доступу сторонніх осіб.

**Висновки.** В результаті проведеного аналізу було визначено принципи організації систем захисту передачі даних у глобальних інформаційних мережах на базі інтерфейсу неортогонального множинного доступу. Була запропонована модель та відповідний математичний апарат для побудови телекомунікаційної мережі організованої відповідно до стандарту 5G, у рамках якої інформаційні вузли користувачів та зломисників розташовані випадковим чином згідно однорідного пуассонівського процесу. Для побудови системи оцінки надійності передачі даних були застосовані статичні дані поточного співвідношення сигналу до суми шуму і інтерференції сигналів та поточного співвідношення сигналу до шуму для користувачів сервісу, а також сторонніх осіб з неавторизованим доступом до мережевого ресурсу.

#### References.

1. Dalby, A., Russell, J., & White, J. (2020). *5G: the complete manual: discover the future of mobile networks*. Future PLC.
2. Maric, S., & Velimirovic, L. Z. (2018). Application of Quasi Orthogonal Short Sequence Families in Pattern Division Multiple Access – a Non Orthogonal Multiple Access Technique. *2018 IEEE 5G World Forum (5GWF)*. <https://doi.org/10.1109/5gwf.2018.8516986>.
3. Kim, J. O., Hendraningrat, D. K., & Shin, S. Y. (2020). A Study of NOMA-SSK for Solving Similar Channel Gain Problem of NOMA Users. *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 45(3), 474–481. <https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.3.474>.
4. Li, J., Nie, S., & Han, C. (2018). ASMC-NOMA: Downlink Adaptive Subcarrier Spacing Multi-Carrier NOMA for 5G Time-Varying Channels. *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. <https://doi.org/10.1109/glocom.2018.8647783>.
5. Khansa, A. A., Chen, X., Yin, Y., Gui, G., & Sari, H. (2020). Performance analysis of Power-Domain NOMA and NOMA-2000 on AWGN and Rayleigh fading channels. *Physical Communication*, 43, 101185. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2020.101185>.

6. Ding, Z., Yang, Z., Fan, P., & Poor, H. V. (2014). On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems with Randomly Deployed Users. *IEEE Signal Processing Letters*, 21(12), 1501–1505. <https://doi.org/10.1109/lsp.2014.2343971>.
7. Ding, Z., Zhu, Y., & Chen, Y. (2018). Conclusions and Future Research Directions for NOMA. *Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond*, 669–677. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-92090-0\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92090-0_21).
8. Liu, Y., Ding, Z., Elkashlan, M., & Poor, H. V. (2016). Cooperative Non-orthogonal Multiple Access With Simultaneous Wireless Information and Power Transfer. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(4), 938–953. <https://doi.org/10.1109/jsac.2016.2549378>.
9. Liu, M., & Chen, M. (2018). Dual-Band Multi-Receiver Wireless Power Transfer with Reactance Steering Network. *2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (Wow)*. <https://doi.org/10.1109/wow.2018.8450913>.
10. Timotheou, S., & Krikidis, I. (2015). Fairness for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems. *IEEE Signal Processing Letters*, 22(10), 1647–1651. <https://doi.org/10.1109/lsp.2015.2417119>.
11. Sousa de Sena, A., & Nardelli, P. (2020). Massive MIMO-NOMA Networks with Imperfect SIC: Design and Fairness Enhancement. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.11566725>.
12. Liu, Y., Ding, Z., Elkashlan, M., & Yuan, J. (2016). Nonorthogonal Multiple Access in Large-Scale Underlay Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(12), 10152–10157. <https://doi.org/10.1109/tvt.2016.2524694>.
13. Analytical Models for Multihop Cognitive Radio Networks. (2008). *Cognitive Radio Networks*, 399–422. <https://doi.org/10.1201/9781420064216-24>.
14. Choi, J. (2015). Minimum Power Multicast Beamforming With Superposition Coding for Multiresolution Broadcast and Application to NOMA Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 63(3), 791–800. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2015.2394393>.
15. Ding, Z., Schober, R., & Poor, H. V. (2016). A General MIMO Framework for NOMA Downlink and Uplink Transmission Based on Signal Alignment. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(6), 4438–4454. <https://doi.org/10.1109/twc.2016.2542066>.
16. Qin, Z., Liu, Y., Ding, Z., Gao, Y., & Elkashlan, M. (2016). Physical layer security for 5G non-orthogonal multiple access in large-scale networks. *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. <https://doi.org/10.1109/icc.2016.7510755>.
17. Mukherjee, A., & Swindlehurst, A. L. (2011). Robust Beamforming for Security in MIMO Wiretap Channels With Imperfect CSI. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 59(1), 351–361. <https://doi.org/10.1109/tsp.2010.2078810>.
18. Liu, Y., Wang, L., Duy, T. T., Elkashlan, M., & Duong, T. Q. (2015). Relay Selection for Security Enhancement in Cognitive Relay Networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 4(1), 46–49. <https://doi.org/10.1109/lwc.2014.2365808>.