

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Факультет «Інформаційно-керуючі системи та технології»

Кафедра «Транспортний зв'язок»

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи бакалавра

на тему:

ПРОЄКТУВАННЯ САМООРГАНІЗУЮЧОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

БРА 02.25.03.107.ПЗ

Виконав:

студент 3 курсу, групи 134-ТКРТ-Д21

спеціальності

172 «Телекомунікації та радіотехніка»

(роботу виконано самостійно відповідно
до принципів академічної доброчесності)

Денис КУЛИК

Керівник:

професор кафедри, доктор техн. наук

Микола ШТОМПЕЛЬ

Рецензент:

доцент кафедри АТ, к.т.н., доцент

Олена ЩЕБЛИКІНА

Харків – 2025 р.

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Факультет «Інформаційно-керуючі системи та технології»

Кафедра «Транспортний зв'язок»

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри, доцент

_____ С.В. Індик
(підпис)

« 07 » _____ квітня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Кулику Денису Едуардовичу

1. Тема роботи:

«Проектування самоорганізуючої телекомунікаційної мережі», керівник роботи: професор кафедри, доктор техн. наук Штомпель Микола Анатолійович, затверджені розпорядженням декана факультету інформаційно-керуючих систем та технологій від 24.02.2025 р. № 11.

2. Строк подання студентом роботи: 06.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

– ВБН В.2.2-33-2007. Проектування телекомунікацій;
– 3GPP TS 32.500 – Self-Organizing Networks (SON); Concepts and requirements — специфікація протоколу;

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): розглянути принцип побудови самоорганізуючих мереж на основі технології LTE; розробити методику оцінки характеристик LTE на фізичному рівні; розробити методику частотно-територіального планування на основі технології LTE для великого міста; провести імітаційне моделювання мережі.

5. Презентаційний матеріал: 11 слайдів.

7. Дата видачі завдання: 07.04.2025 р.

№ з/п	Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1	Підготовка матеріалів до оглядово-аналітичної частини дипломної роботи	21.04.2025 р	виконано
2	Розробка розділу оглядово-аналітичного характеру	12.05.2025 р	виконано
3	Розробка розділів спеціальної частини дипломної роботи з елементами моделювання	26.05.2025 р	виконано
4	Підготовка графічного матеріалу, доповіді, подання роботи на рецензію та затвердження	2.06.2025 р.	виконано

Здобувач

(підпис)

Денис КУЛИК

Керівник роботи

професор кафедри, доктор техн. наук,

(підпис)

Микола ШТОМПЕЛЬ

Відповідальний за нормоконтроль

доцент кафедри, канд. техн. наук, доцент

(підпис)

Ірина КОВТУН

АНОТАЦІЯ

Актуальність роботи. Зростання попиту на високошвидкісні бездротові сервіси у містах вимагає використання сучасних технологій мобільного зв'язку, здатних забезпечити високу якість обслуговування користувачів. Технологія LTE, поєднана з принципами самоорганізуючих мереж (SON), дозволяє автоматизувати процеси конфігурації, оптимізації та самовідновлення мережі, що є критично важливим у великих урбанізованих середовищах. Аналіз фізичного рівня LTE, моделювання характеристик радіоінтерфейсу та частотно-територіальне планування мережі дозволяють ефективно проектувати мобільні системи зв'язку з урахуванням реальних умов середовища.

Ключові слова: LTE, самоорганізуюча мережа, OFDM, MIMO, SAE, OPNET, фізичний рівень, імітаційне моделювання, радіоінтерфейс, частотне планування.

Об'єкт дослідження: процес побудови та планування мобільних інфокомунікаційних мереж на основі технології LTE з елементами самоорганізації.

Мета роботи: проаналізувати принципи функціонування самоорганізуючих LTE-мереж, розробити методику оцінки фізичних характеристик LTE, а також виконати частотно-територіальне планування і моделювання міської стільникової мережі LTE з використанням середовища OPNET.

Структура та обсяг роботи: робота викладена на 47 сторінках друкованого тексту, містить 15 рисунків, 2 таблиці, 23 джерела літератури. Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, переліку умовних позначень та списку використаних джерел.

У першому розділі проаналізовано поняття та принципи функціонування самоорганізуючих мобільних мереж на базі технології LTE, а також обґрунтовано доцільність їх впровадження у сучасних мережах зв'язку.

Другий розділ присвячено дослідженню фізичного рівня LTE, зокрема розглянуто технології OFDM та MIMO, їх взаємодію та вплив на продуктивність мережі. Описано мережеву архітектуру SAE як основу інфраструктури LTE.

У третьому розділі розроблено методику частотно-територіального планування LTE-мережі для умов великого міста, виконано розрахунок кількості стільників і параметрів покриття, а також проведено імітаційне моделювання проєктованої мережі.

Методи дослідження: теоретичний аналіз, математичне моделювання, розрахункові методи, імітаційне моделювання.

Рекомендації щодо використання та результати впровадження. Запропонована методика може бути використана під час проєктування LTE-мереж у щільно забудованих міських зонах. Імітаційна модель у OPNET дозволяє перевірити ефективність технічних рішень на етапі планування та адаптувати параметри мережі до динамічних умов реального середовища.

ABSTRACT

Relevance of the work. The growing demand for high-speed wireless services in urban areas necessitates the use of modern mobile communication technologies capable of providing high quality of service to users. LTE technology, combined with the principles of Self-Organizing Networks (SON), enables automation of configuration, optimization, and self-healing processes, which is critically important in densely populated urban environments. Analysis of the LTE physical layer, modeling of radio interface characteristics, and frequency-territorial network planning allow for efficient design of mobile communication systems taking into account real environmental conditions.

Keywords: LTE, self-organizing network, OFDM, MIMO, SAE, OPNET, physical layer, simulation modeling, radio interface, frequency planning.

Object of the: the process of designing and planning mobile infocommunication networks based on LTE technology with elements of self-organization.

The purpose of the research: to analyze the principles of functioning of self-organizing LTE networks, to develop a methodology for evaluating LTE physical characteristics, as well as to carry out frequency-territorial planning and simulation modeling of an urban LTE cellular network using the OPNET environment.

Structure and scope of the work: the work is presented on 47 pages of printed text and includes 15 figures, 2 tables, and 23 literature sources. The thesis consists of an introduction, three chapters, conclusions, a list of abbreviations, and a list of references.

The first chapter analyzes the concepts and principles of operation of self-organizing mobile networks based on LTE technology and justifies the feasibility of their implementation in modern communication systems.

The second chapter focuses on the study of the LTE physical layer, in particular the OFDM and MIMO technologies, their interaction, and their impact on network performance. The SAE network architecture is described as the foundation of the LTE

infrastructure.

In the third chapter, a methodology for frequency-territorial planning of an LTE network for a large urban area is developed. The number of cells and coverage parameters are calculated, and simulation modeling of the designed network is carried out.

Research methods theoretical analysis, mathematical modeling, calculation methods, simulation modeling.

Recommendations for use and implementation results. The proposed methodology can be used in the design of LTE networks in densely built-up urban areas. The simulation model allows for verification of the effectiveness of technical solutions at the planning stage and adaptation of network parameters to the dynamic conditions of the real environment.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	9
Вступ	10
1 Принцип побудови самоорганізуючих мереж на основі технології LTE	11
1.1 Поняття самоорганізуючої системи	11
1.2 Мобільні самоорганізуючі мережі	12
2 Розробка методики оцінки характеристик LTE на фізичному рівні	23
2.1 Принципи побудови радіоінтерфейсу за технологією LTE	23
2.2 Технологія OFDM	24
2.3 Багатоантенні системи MIMO	26
2.4 Загальна характеристика технології MIMO - OFDM	28
2.5 Мережева архітектура SAE	29
3 Методика частотно-територіального планування на основі технології LTE для великого міста	31
3.1 Початкові дані для проектування	31
3.2 Розрахунок параметрів міської стільникової мережі LTE	32
3.3 Імітаційне моделювання мережі в середовищі OPNET	38
Висновки	44
Список використаних джерел	46

ВСТУП

Сучасні бездротові цифрові комунікації демонструють стрімкий розвиток, значною мірою завдяки прогресу в галузі мікроелектроніки, що забезпечує створення все більш потужних, але доступних засобів зв'язку.

Одним із перспективних напрямів телекомунікацій є самоорганізовані бездротові мережі. Такі мережі здатні функціонувати без попередньо побудованої інфраструктури, що дозволяє швидко розгортати їх у різних умовах. Самоорганізація в мережах — це принцип, який знаходить застосування не лише в телекомунікаціях, а й у біологічних, екологічних та соціальних системах, де спостерігається подібна складна топологія взаємодії елементів.

Однією з ключових технологій, що реалізує принципи самоорганізації, є LTE (Long-Term Evolution), яка розробляється в межах проєкту 3GPP (Third Generation Partnership Project).

Технологія LTE базується на використанні сучасних методів багаточастотного мультиплексування (OFDM) і підтримує IP-орієнтовану архітектуру SAE (System Architecture Evolution). Вона дозволяє забезпечити високу швидкість передавання даних, ефективне використання частотного спектру, зменшення енергоспоживання пристроїв і зниження вартості надання телекомунікаційних послуг.

Метою цієї роботи є розроблення методики частотно-територіального планування та імітаційного моделювання мереж LTE на фізичному та мережевому рівнях. Це дозволить обґрунтувати оптимальні підходи до проєктування сучасних телекомунікаційних систем з урахуванням технічних, економічних і просторових параметрів.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи було комплексно досліджено принципи побудови самоорганізуючих мобільних мереж на основі технології LTE, розроблено методику оцінки характеристик фізичного рівня радіоінтерфейсу, а також виконано частотно-територіальне планування мережі LTE з подальшим імітаційним моделюванням у середовищі OPNET.

У першому розділі розглянуто поняття самоорганізуючих систем та специфіку їх застосування в мобільному зв'язку. Було проаналізовано архітектуру та функціональні особливості мобільних самоорганізуючих мереж (SON), які дозволяють зменшити експлуатаційні витрати, підвищити продуктивність мережі та автоматизувати процеси конфігурації, оптимізації та самовідновлення. Визначено, що застосування SON у системах LTE є ключовим для забезпечення високої якості обслуговування в умовах зростаючого трафіку.

У другому розділі сформовано методику оцінки характеристик LTE на фізичному рівні. Детально розглянуто принципи побудови радіоінтерфейсу LTE, включаючи застосування технологій OFDM та MIMO. Показано, що використання багатотонавої модуляції OFDM забезпечує високу спектральну ефективність і стійкість до міжсимвольних завад. Багатоантенні системи MIMO, у свою чергу, дозволяють підвищити пропускну здатність і якість передачі даних. Проведений аналіз взаємодії технологій MIMO-OFDM підтвердив доцільність їх комплексного використання в мережах LTE. Також було охарактеризовано архітектуру еволюційної мережі доступу (SAE), яка є основою для побудови ефективної мережевої інфраструктури.

У третьому розділі розроблено методику частотно-територіального планування LTE-мережі для умов великого міста. Виходячи з початкових даних, виконано розрахунок параметрів міської стільникової мережі, включаючи визначення кількості базових станцій, радіусів покриття, розрахунок навантаження та пропускну здатності. Для перевірки коректності розрахунків та

оцінки ефективності функціонування мережі було здійснено імітаційне моделювання, яке дозволило візуалізувати процеси передачі даних, перевірити функціональність протоколів та оцінити якість сервісу при різних умовах трафіку.

Результати роботи підтверджують, що технологія LTE, у поєднанні з принципами самоорганізації та сучасними засобами планування й моделювання, дозволяє ефективно будувати мобільні мережі нового покоління з високим рівнем адаптивності, продуктивності й надійності. Запропонована методика частотно-територіального планування та використання імітаційного моделювання є актуальними інструментами для інженерів телекомунікаційних систем у процесі проектування LTE-мереж у складних міських умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ETSI. GSM Specifications. European Telecommunications Standards Institute, 1991. – 120 p.
2. 3GPP. 3GPP Releases Overview. Third Generation Partnership Project, 2022. – 350 p.
3. ITU. International Telecommunications Union Reports on Mobile Networks. ITU Publications, 2018. – 280 p.
4. ETSI. ETSI Standards for IoT and Mobile Communications. ETSI Press, 2019. – 200 p.
5. Kumar, P., Reddy, S. Evolution of Cellular Networks: From GSM to 5G. Journal of Wireless Communications, 2022. – 450 p.
6. J. Zhang, M. Z. Shakir, S. Zeadally, and C. Yuen, "Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) for Mobile Communications," Springer, 2010.
7. A. Ghosh, "HSPA+ and LTE for Mobile Broadband: Evolution to LTE-Advanced," Cambridge University Press, 2011.
8. 3GPP, "Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) Technical Specifications," 3GPP TS 25.101, 2000.
9. R. Ratasuk, "MIMO Technology and Performance in 3G and Beyond," IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 5, 2011.
10. Dahlman, E., Parkvall, S., & Skold, J. 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. Academic Press, 2014. – 450 p.
11. Huang, L., & Liu, Y. Introduction to LTE/LTE-Advanced: Evolution of Mobile Networks. Elsevier, 2018. – 250 p.
12. 3GPP TS 36.300 LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Packet Core (EPC); Overall Description. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 2020. – 500 p.
13. Akdeniz, M., & Nallanathan, A. LTE-Advanced and 5G: Future Mobile Communications. Springer, 2017. – 350 p.

- 14 ITU-R. IMT Vision - Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond. Technical Report M.2083, ITU-R, September 2015.
15. Wang, C. X., & Zhang, J. 5G Mobile Networks: From LTE to Beyond. Wiley, 2016. – 250 p.
16. ITU-R. IMT-2020 Requirements and Evaluation. International Telecommunication Union, 2021. – 75 p.
17. . Rappaport, T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. Prentice Hall, 2002. – 1050 p.
- 18 Andrews, J. G., & Ghosh, A. 5G: Theory and Practice. Cambridge University Press, 2019. – 400 p.
19. ETSI. ETSI Standards for IoT and Mobile Communications. ETSI Press, 2019. – 200 p.
20. Zheng, K., & Xu, J. Mobile Communications: Challenges in 5G and Beyond. Springer, 2020. – 300 p.
21. Ericsson, Sierra Wireless. IMT-2020 Self-Evaluation: mMTC Coverage, Data Rate, Latency and Battery Life. Technical Report R1-1903119, Ericsson, Sierra Wireless, March 2019.
22. Ch. Kuhlins, B. Rathonyi, A. Zaidi, and M. Hogan. Cellular Networks for Massive IoT. Technical Report Uen 284 23-3278, Ericsson, January 2020
- 23 A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi. Internet of Things for Smart Cities. IEEE Internet of Things Journal, vol. 1(no. 1): pp. 22–32, 2014.