

АНОТАЦІЯ

Бешлей Г.В. Моделі та метод оптимального розподілу мережних ресурсів в програмно-конфігурованих гетерогенних мережах мобільного зв'язку. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2021.

В умовах швидкого зростання трафіку мобільного передавання даних, популярності Інтернету речей (Internet of Things, IoT) та міжмашинної взаємодії (Machine-to-Machine, M2M), оператори мобільного зв'язку постійно працюють над покращенням якості надання послуг, розвиваючи мережі 4G в напрямку майбутніх програмно-конфігурованих гетерогенних мереж 5G. Відсутність можливості в мережах четвертого покоління здійснювати наскрізне диференційоване управління окремими потоками від мобільних та M2M/IoT пристроїв, із врахуванням їх вимог до параметрів якості обслуговування (Quality of Service, QoS), призводить до нераціонального розподілу навантаження та погіршення якості обслуговування сервісів реального часу. У зв'язку з цим, до основних завдань сучасних безпроводних мереж відноситься оптимізація розподілу обмеженої кількості частотно-часового ресурсу між користувачами та пристроями Інтернету речей за критерієм якості обслуговування.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуального науково-практичного завдання підвищення ефективності використання ресурсів та якості обслуговування в системах мобільного зв'язку 4G/5G шляхом розроблення моделей гнучкого управління інформаційними потоками та методів оптимального розподілу мережних ресурсів.

Метою роботи є підвищення ефективності використання частотно-часових ресурсів та забезпечення якості надання послуг в мережах мобільного зв'язку 4G/5G шляхом удосконалення моделей управління трафіком та методів оптимального розподілу ресурсу.

Об'єктом дослідження є процес оптимального розподілу частотно-часових ресурсів між мобільними користувачами та IoT/M2M датчиками в умовах зростання їх кількості.

Предмет дослідження є моделі, методи і алгоритми гнучкого управління інформаційними потоками та розподілу мережевих ресурсів в системах мобільного зв'язку 4G/5G.

В процесі досліджень використано методи теорії алгоритмів, оптимізації, імітаційного та аналітичного моделювання, математичної статистики та об'єктно-орієнтованого програмування.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, констатовано зв'язок роботи з науковими програмами, темами, сформульовано мету і завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про впровадження результатів роботи, її апробацію, публікації та особистий внесок здобувача.

У першому розділі **«Аналіз сучасного стану, проблем і перспектив розвитку мереж 4G/5G в умовах зростання трафіку»** розглянуто основні проблеми, що можуть появитися в сучасних мережах мобільного зв'язку в умовах значного зростання трафіку. Описано та проаналізовано можливості надання послуг абонентам у мережі четвертого покоління і наголошено на вузькому місці в архітектурі LTE. Також відзначено основні моменти передавання інформації, що пов'язані із використанням вузькосмугових технологій. Досліджено існуючі протоколи та технології в мережі LTE, частотно-часовий розподіл ресурсів, способи пріоритезації трафіку, структуру кадру LTE, частотні діапазони. Проведено огляд існуючих методів управління інформаційними потоками та розподілу радіоресурсів для забезпечення якості обслуговування в мережах 4G/5G. Обґрунтовано актуальність науково-практичного завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі **«Методи оптимального розподілу ресурсів та управління інформаційними потоками в мережах мобільного зв'язку 4G/5G»** запропоновано архітектуру мобільної мережі 4G стандарту LTE із нововведеним M2M шлюзом, яка може бути основою і для побудови мереж 5G в

умовах масового розгортання сервісів Інтернету речей та міжмашиної взаємодії. На рівні нововведеного шлюза удосконалено процес кластеризації M2M пристроїв, пріоритезації та агрегації трафіку із можливістю балансування навантаження між різними базовими станціями. Таке рішення дасть змогу операторам мережі залишити існуючі базові станції eNodeB без змін, зменшити на них сигнальне навантаження від M2M датчиків та відповідно покращити якість обслуговування. Розроблено метод гнучкого управління інформаційними потоками на M2M шлюзах та розподілу частотно-часових ресурсів в гетерогенній мережі 4G/5G. Запропоновано спосіб підрахунку виграшу по сигналізації при кластеризації датчиків. Розроблено метод оптимального розподілу частотно-часових ресурсів в мережах стандарту LTE на основі адаптивного вибору ширини смуги радіочастот. Також описано принцип виділення частотно-часових ресурсів на основі коефіцієнта заповненості послідовності кадрів. Детально пояснено метод оптимального розподілу частотно-часових ресурсів за критерієм максимально допустимого часу передавання даних із сталим обсягом інформації на основі коефіцієнта заповненості послідовності кадрів.

У третьому розділі **«Моделювання та дослідження ефективності використання методу оптимального розподілу частотно-часових ресурсів в гетерогенній мережі 4G/5G»** проведено аналітичне дослідження запропонованого методу розподілу радіоресурсів LTE мережі та наголошено на особливостях резервування субкадрів в різних смугах. Виведено узагальнюючу схему обслуговування мобільних користувачів та M2M датчиків. Розроблено імітаційну модель процесу функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку, яка автоматизує запропонований метод оптимального розподілу частотно-часових ресурсів. Досліджено доступність ресурсів базової станції в залежності від розташування абонентів (пристроїв) та показано основні моменти при виділенні частотно-часових ресурсів при обслуговуванні мобільних користувачів і M2M датчиків згідно класичної архітектури LTE та архітектури доповненої мультистандартним шлюзом. Доведено, що застосування мультистандартних M2M шлюзів в архітектурі LTE дало змогу мінімізувати

кількість сигнальної інформації в процесі агрегації M2M трафіку до 10%, що у поєднанні із методом оптимального розподілу ресурсів забезпечило розвантаження мережі в середньому на 9% та підвищення середнього значення спектральної ефективності на 6 %.

У четвертому розділі «**Розробка науково-практичних підходів щодо реалізації запропонованих рішень управління трафіком та розподілом ресурсів у перспективних програмно-конфігурованих мережах мобільного зв'язку**» запропоновано концептуальну модель програмно-конфігурованої мобільної мережі нового покоління, яка дасть змогу забезпечити узгоджене на рівні базової станції, ядра мережі та зовнішніх IP-орієнтованих мереж, диференційоване адаптивне управління ресурсами та окремими інформаційними потоками від мобільних та M2M/IoT пристроїв з метою гарантування наскрізної якості обслуговування в умовах тимчасової нестачі спектральних ресурсів та нестабільності радіоканалу. Обґрунтовано науково-теоретичні підходи щодо реалізації програмно-конфігурованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі технологій SDN/NFV та SDR. Проведено дослідження процесу організації наскрізного гарантування пропускної здатності фізичного каналу в концептуальній мережі мобільного зв'язку. На основі імітаційного моделювання досліджено процес завантаженості SDR фемтосоти користувачами технологій різного покоління мобільного зв'язку.

У **висновках** дисертаційної роботи викладено основні результати і рекомендації, які впливають з проведених досліджень, представлено та охарактеризовано кількісні оцінки показників ефективності в умовах використання запропонованих рішень.

У **додатках** до дисертації долучено програмні коди реалізації імітаційних моделей, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список наукових праць і апробацій автора за темою дисертації.

Ключові слова: гетерогенна мережа, якість обслуговування, розподіл ресурсів, 4G/5G, LTE, M2M, кластеризація, пріоритезація.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. S. Jun, K. Przystupa, M. Beshley, O. Kochan, H. Beshley, M. Klymash, J. Wang, D. Pieniak, "A Cost-Efficient Software Based Router and Traffic Generator for Simulation and Testing of IP Network," *Electronics*, vol. 9, no. 1, pp. 40-1–40-24, Jan. 2020. (Scopus/Web of Science Q2).

2. W. Song, M. Beshley, K. Przystupa, H. Beshley, O. Kochan, A. Pryslupskyi, D. Pieniak, J. Su, "A Software Deep Packet Inspection System for Network Traffic Analysis and Anomaly Detection," *Sensors*, vol. 20, no. 6, p. 1637-1–1637-41, March 2020. (Scopus/Web of Science Q1).

3. M. Beshley, N. Kryvinska, M. Seliuchenko, H. Beshley, E. Shakshuki, A. Yasar, "End-to-End QoS “Smart Queue” Management Algorithms and Traffic Prioritization Mechanisms for Narrow-Band Internet of Things Services in 4G/5G Networks," *Sensors*, vol. 20, no.8, pp.2324-1–2324-30, Apr. 2020. (Scopus/Web of Science Q1).

4. M. Beshley, M. Klymash, M. Seliuchenko, O. Lavriv, V. Chervenets, H. Kholiavka, "Increasing the efficiency of real-time content delivery by improving the technology of priority assignment and processing of IP traffic", *Smart Computing Review*, vol. 5, no. 2, pp. 76 – 88, 2015.

5. V. Romanchuk. M. Beshley, A. Prislupskiy, H. Beshley, O. Panchenko, "Method of multiservice infrastructure decomposition with network resource slicing for IoT," *Internet of Things (IoT) and Engineering Applications*, vol. 3, no.1, pp. 22 – 23, May 2018.

6. І.О. Кагало, М.І. Бешлей, М.М. Климаш, О.М. Панченко, Г.В. Бешлей, "Адаптивне формування багаторівневої радіоструктури інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi," *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(64), с. 24 – 38, 2019.

7. В.І. Романчук, М.І. Бешлей, А.М. Прислупський, Г.В. Бешлей, "Метод декомпозиції структури мережного пристрою з віртуалізацією ресурсів," *Наукові записки Української академії друкарства*, №1(56), с. 31 – 42. 2018.

8. Г.В. Бешлей, М.О. Селюченко, І.А Берневек, С.І. Пушак, М.І. Бешлей, "Алгоритм кластеризації, агрегації та класифікації M2M пристроїв в

гетерогенній мережі 4G/5G," *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. *Радіоелектроніка та телекомунікації*, № 874, с. 95 – 102, 2017.

9. М.М. Климаш, М.І. Бешлей, Б.М. Стрихалюк, Г.В. Холявка та О.А. Лаврів, "Підвищення якості обслуговування в конвергентних мобільних системах на основі платформи UMA-A," *Проблеми телекомунікацій*, № 1 (13), с. 3 – 19, 2014.

10. Б.М. Стрихалюк, М.І. Бешлей, Г.В. Холявка, М.В. Брич, "Моделювання та тестування системи управління гетерогенної мережі доступу", *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 1, с. 22 – 31, 2015.

11. М.І. Бешлей, М.О. Селюченко, О.А. Лаврів, А.Р. Масюк, Г.В. Холявка, "Оцінка адекватності функціонування програмного маршрутизатора у процесі обслуговування мультимедійного трафіку," *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*, серія "Радіоелектроніка та телекомунікації", №. 818, с. 162 – 173, 2015.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. I. Kahalo, H. Beshley, A. Masiuk and V. Pashkevych, "The Method of Transmitting Real-Time Video Streams for Wi-Fi Networks with Short-Term Channel Failures," *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 356 – 359.

13. I. Kahalo, H. Beshley, M. Beshley and O. Panchenko, "Enhancing QoS and energy efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi integrated network based on adaptive technique for radio structure formation," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, 2019, pp. 1167 – 1170.

14. H. Beshley, M. Klymash, M. Beshley and I. Kahalo, "Improving the efficiency of LTE spectral resources use by introducing the new of M2M/IoT multi-service gateway," *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Polyana, Ukraine, 2019, pp. 114 – 117.

15. H. Beshley, O. Panchenko and M. Kyryk, "Investigation and Implementation of Methods for Controlling the Intensity of Flow of Information Protocols," *2018*

International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, 2018, pp. 1 – 5.

16. Z. Hu, I. Kahalo, H. Beshley, N. Diachenko and S. Jun, "The Method of Adaptive Radio Coverage Formation of Wireless Network Based on the Wi-Fi controller," *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2020, pp. 910 – 914.

17. Z. Cheng, M. Beshley, H. Beshley, O. Kochan and O. Urikova, "Development of deep packet inspection system for network traffic analysis and intrusion detection," *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, 2020, pp. 877–881.

18. H. Beshley, M. Beshley, T. Maksymyuk and I. Strykhalyuk, "Method of centralized resource allocation in virtualized small cells network with IoT overlay," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, 2018, pp. 1147–1151.

19. A. Masiuk, H. Beshley, B. Koval and R. Basa, "Resource management method in LTE heterogeneous networks," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Slavske, 2018, pp. 1131 – 1134.

20. H. Beshley, M. Kyryk, M. Beshley and O. Panchenko, "Method of Information Flows Engineering and Resource Distribution in 4G/5G Heterogeneous Network for M2M Service Provisioning," *2018 IEEE 4th International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Lviv, 2018, pp. 229 – 233.

21. M. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko and T. Maksymyuk, "Improving architecture of LTE mobile network for IoT services provisioning," *2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, 2017, pp. 209 – 212.

22. M. Klymash, H. Beshley, O. Panchenko and M. Beshley, "Method for optimal use of 4G/5G heterogeneous network resources under M2M/IoT traffic growth conditions," *2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, 2017, pp. 1 – 5.

23. M. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko and M. Beshley, "Algorithm for clusterization, aggregation and prioritization of M2M devices in heterogeneous 4G/5G network," *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkov, 2017, pp. 182 – 186.

24. M. Klymash, H. Beshley, A. Masiuk and I. Strykhalyuk, "Concept for ensuring effective functioning of mobile communication system in heterogenous 5G infrastructure," *2017 14th International Conference the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, 2017, pp. 272 – 274.

25. V. Chervenets, V. Romanchuk, H. Beshley and A. Khudyu, "QoS/QoE correlation modified model for QoE evaluation on video service," *2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, 2016, pp. 664 – 666.

26. М.І. Бешлей, М.М. Климаш, О.М. Панченко, Г.В. Бешлей, "Розроблення системи моніторингу та аналізу трафіку інформаційно телекомунікаційної мережі для виявлення аномалії і запобігання атак," *I міжнародна науково-практична конференція "Проблеми кібербезпеки інформаційно телекомунікаційних систем" (PCSITS)*, м. Київ, 2018 р., с. 201–203.

27. М.М. Климаш, А.Р. Масюк, Г.В. Бешлей, М.І. Бешлей, "Концепція програмно конфігурованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі технологій SDN/NFV та SDR," *Фізико-технологічні проблеми , обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Чернівці, 2016 р., с. 35 – 36.

28. М.І. Бешлей, О.А. Лаврів, Г.В. Холявка, "Дослідження методів побудови конвергентної мережі оператора мобільного зв'язку для надання послуг Quad Play," *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та*

інформаційних технологій: тези доповідей VII Міжнародної науково-практичної конференції, м. Запоріжжя, 2014 р., с. 76 – 77.

29. Б.М. Стрихалюк, Р.М. Савчук, М.І. Бешлей, Г.В. Холявка, "Модель управління радіо ресурсами фемтосоти для забезпечення якісного надання мультисервісних послуг," *VI Міжнародний науково-технічний симпозіум "Нові технології в телекомунікація"*, с. Вишків, 2013р., с. 43 – 46.

30. М.О. Селюченко, Г.В. Бешлей, А.Р. Масюк, М.І. Бешлей, "Багаторівневе управління ресурсами в гетерогенній мульти-операторській мережі," *1st International Conference "Advanced Information and Communication Technologies"(AICT'2015)*, Lviv, 2015, pp. 125 – 128.