

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БЕШЛЕЙ ГАЛИНА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 621.396

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛІ ТА МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ МЕРЕЖНИХ
РЕСУРСІВ В ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ
МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

17 «Електроніка та телекомунікації»
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ / Бешлей Галина Володимирівна /

Науковий керівник

Климаш Михайло Миколайович д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

ЛЬВІВ – 2021

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 випливають 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". Радіoeлектроніка 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 "Радіoeлектроніка 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 симпозиум "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.

ABSTRACT

Beshley H.V. Models and method of optimal network resources distribution in software-defined heterogeneous mobile networks. – Qualification research paper as a manuscript.

The thesis for the Doctor of Philosophy Degree in the specialty 172 – Telecommunications and Radio Engineering. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2021.

With the rapid growth of mobile data traffic, the popularity of the Internet of Things (IoT) and Machine-to-Machine (M2M) communication, mobile operators are constantly working to improve the quality of service, developing 4G networks into the future of 5G software-defined heterogeneous networks. The lack of possibility in 4G networks to perform end-to-end differentiated management of individual flows from mobile and M2M/IoT devices, taking into account their requirements to quality of service (Quality of Service, QoS) parameters, leads to inefficient load balancing and degradation of real-time services. In this regard, the main tasks of the modern wireless networks include optimizing the distribution of a limited amount of time-frequency resource between users and IoT devices according to the quality of service criterion.

The thesis is devoted to solving the actual scientific and practical task of improving the efficiency of resource utilization and quality of service in 4G/5G mobile communication systems by developing models for flexible management of information flows and methods for optimal allocation of network resources.

The purpose of this work is to improve the efficiency of time-frequency resources and the quality of service in 4G/5G mobile networks by improving the models of traffic management and methods of optimal resource allocation.

The object of the research is the process of optimal allocation of time-frequency resources between mobile users and IoT/M2M sensors in a growing number of them.

The subject of the research are models, methods and algorithms for flexible management of information flows and network resource allocation in 4G/5G mobile communication systems.

In the process of research, methods of algorithm theory, optimization, simulation and analytical modeling, mathematical statistics and object-oriented programming have been used.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the thesis work, states the relationship of the work with scientific programs, topics, formulates the purpose and objectives of research, scientific novelty and practical significance of the results obtained. Data on the implementation of the results of the work, its approbation, publications and personal contribution of the applicant are given.

In the first chapter «**Analysis of the current state, problems and prospects of 4G/5G networks development in the conditions of traffic growth**» the main problems, which may appear in modern mobile networks in the conditions of significant growth of traffic, are considered. Described and analyzed the possibility of providing services to subscribers in the fourth generation network and noted the bottleneck in the LTE architecture. Also noted the main points of the transfer of information related to the use of narrowband technology. Existing protocols and technologies in LTE network, frequency-time distribution of resources, methods of traffic prioritization, the structure of LTE frame, frequency bands were studied. A review of existing methods of information flow management and radio resource allocation to ensure the quality of service in 4G/5G networks was carried out. The relevance of the scientific and practical task of the thesis research is substantiated.

In the second chapter «**The method of optimal resource allocation and management of information flows in 4G/5G mobile networks**» the architecture of a 4G mobile network of LTE standard with a newly introduced M2M gateway, which can be the basis for the construction of 5G networks in terms of mass deployment of IoT and M2M interaction services, has been proposed. At the level of the new gateway, the process of clustering M2M devices, prioritization and aggregation of

traffic with the possibility of load balancing between different base stations has been improved. This solution will allow network operators to leave existing base stations unchanged, reducing the signal load from M2M sensors and, consequently, improving the quality of service. A method for flexible management of information flows at M2M gateways and time-frequency resources allocation in a heterogeneous 4G/5G network is developed. A method for calculating signaling gains in sensor clustering is proposed. A method for optimal allocation of time-frequency resources in LTE networks based on the adaptive selection of frequency bands is developed. The principle of time-frequency resources allocation based on the frame sequence occupancy factor is also described. A method for optimal allocation of time-frequency resources by the criterion of maximum permissible data transmission time with a constant amount of information based on the frame sequence occupancy factor is explained in detail.

In the third chapter «**Modeling and research of the effectiveness of using the method of optimal allocation of time-frequency resources in a heterogeneous 4G/5G network**» analytical research of the proposed LTE network radio resource allocation method is conducted and the features of sub-frame reservation in different bands are noted. A generalized scheme for servicing mobile users and M2M sensors is presented. A simulation model of the process of functioning of a heterogeneous mobile network is developed. This model automates the proposed method of optimal allocation of time-frequency resources. The availability of base station resources depending on the location of users (devices) was studied. The main points in the allocation of time-frequency resources when servicing mobile users and M2M sensors according to the classical LTE architecture and the architecture supplemented by a multi-standard gateway were shown. It has been proved that application of multi-standard M2M gateways in LTE architecture allowed minimizing the amount of signaling information in the process of M2M traffic aggregation up to 10%. This combined with optimal resource allocation method has ensured 9% average network offload and 6% increase in average spectral efficiency.

In the fourth chapter «**Development of the scientific and practical approaches to the implementation of the proposed solutions for traffic management and resource allocation in promising software-defined heterogeneous mobile networks**» a conceptual model of a software-defined next-generation mobile network is proposed. This model will provide coordinated at the level of the base station, the core network and external IP-oriented networks, differentiated adaptive management of resources and individual information flows from mobile and M2M/IoT devices to ensure end-to-end service quality under conditions of temporary lack of spectral resources and instability of the radio channel. Scientific and theoretical approaches to the implementation of software-configurable heterogeneous mobile network based on SDN/NFV and SDR technologies have been substantiated. The study of the process of organizing the end-to-end provision of physical channel capacity in the conceptual mobile communication network is conducted. On the basis of simulation modeling the process of SDR femtocell loading by users of different generation of mobile communication technologies was investigated.

In the **conclusions** of the thesis work the main results and recommendations arising from the conducted research are presented and quantitative assessments of efficiency indicators under the conditions of using the proposed solutions are characterized.

In the **appendices** to the thesis, program codes of implementation of simulation models, acts of implementation of the results of the thesis work, as well as a list of scientific works and approbations of the author on the subject of the thesis are added.

Key words: heterogeneous network, quality of service, resource allocation, 4G/5G, LTE, M2M, clustering, prioritization.

The list of author's publications:

Proceedings where basic scientific results of thesis were published:

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. I.O. Kahalo, M.I. Beshley, M.M. Klymash, O.M. Panchenko, H.V. Beshley, "Adaptive Formation of the Multilevel Radio Structure of LTE/Wi-Fi Integrated Networks,"*Telecommunication and information technologies*, № 3(64), pp. 24–38, 2019.

7. V.I. Romanchuk, M.I. Beshley, A.M. Prislupskiy, H.V. Beshley, "Method of decomposition of the structure of the network device for resource virtualization," *Scientific notes of the Ukrainian Academy of Printing*, №1(56), pp. 31– 42, 2018.

8. H.V. Beshley, M.O. Seliuchenko, I.A. Bernevek, S.I. Pushchuk, M.I. Beshley, "Algorithm for clustering, aggregation and classification of M2M devices in a

heterogeneous 4G/5G network," *Herald of Lviv Polytechnic National University, Series of Radioelectronics and Telecommunications*, № 874, pp. 95 – 102, 2017.

9. M.M. Klymash, M.I. Beshley, B.M. Strykhalyuk, H.V. Kholiavka and O.A. Lavriv, "Improving service quality in converged mobile systems based on the UMA-A platform," *Telecommunications issues*, № 1 (13), pp. 3 – 19, 2014.

10. B.M. Strykhalyuk, M.I. Beshley, H.V. Kholiavka, and M.V. Brych, "Modeling and testing of heterogeneous access network management system," *Telecommunication and information technologies*, № 1, pp. 22–31, 2015.

11. M.I. Beshley, M.O. Seliuchenko, O.A. Lavriv, A.R. Masiuk, H.V. Kholiavka, "Assessment of the adequacy of the operation of the software router in the process of servicing multimedia traffic," *Herald of Lviv Polytechnic National University, Series of Radioelectronics and Telecommunications*, №. 818, c. 162–173, 2015.

Proceedings that certify an improvement of thesis materials:

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. Khudyy, "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. . M.I. Beshley, M.M. Klymash, O.M. Panchenko, H.V. Beshley, "Development of monitoring and traffic analysis system of information telecommunication network for anomaly detection and attack prevention," *I International Scientific and Practical Conference "Problems of cybersecurity of information and telecommunication systems". (PCSITS)*, Kiev, 2018, pp. 201–203.

27. M.M. Klymash, A.R. Masyuk, H.V. Beshley, M.I. Beshley, "The concept of software-defined heterogeneous mobile network based on SDN/NFV and SDR technologies," *V International scientific conference «Physical and technological*

problems of transfer, processing and storage information in infocommunication systems», Chernivtsi, 2016, pp. 35–36.

28. M.I. Beshley, O.A. Lavriv, H.V. Kholiavka "Research the methods of designing a converged network of mobile operator for providing Quad Play services," *Modern problems and achievements in the field of radio engineering, telecommunications and information technology: theses of the VII International Scientific and Practical Conference*, Zaporozhye, 2014, pp. 76 – 77.

29. B.M. Strykhalyuk, R.M. Savchuk, M.I. Beshley, H.V. Kholiavka, "The model of femtocell radio resource management to ensure the quality provision of multiservice services," *VI International Scientific and Technical Symposium "New Technologies in Telecommunications"*, Vyshkov, 2013. p.43 – 46.

30. M.O. Seliuchenko, H.V. Beshley, A.R. Masyuk, M.I. Beshley, "Multilevel resource management in a heterogeneous multi-operator network," *1st international conference "Advanced information and communication technologies"(AICT'2015)*, Lviv, 2015, pp. 125–128.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	27
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ, ПРОБЛЕМ І ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ МЕРЕЖ 4G/5G В УМОВАХ ЗРОСТАННЯ ТРАФІКУ	35
1.1. Аналіз сучасного стану безпроводних мереж мобільного зв'язку в умовах швидкого зростання трафіку Інтернету речей та кількості користувачів потокового контенту.....	35
1.2. Необхідність та перспективи розвитку мереж мобільного зв'язку в напрямку 4G/5G.....	42
1.3. Безпроводні вузькосмугові технології передавання даних та можливості їх використання у гетерогенній мережі 4G/5G.....	48
1.4. Аналіз існуючих методів розподілу частотно-часових ресурсів у сучасних мережах мобільного зв'язку стандарту LTE.....	51
1.5. Огляд існуючих методів управління інформаційним потоками та необхідність їх розвитку для забезпечення якості обслуговування в мережах 4G/5G.....	63
1.6. Постановка науково-практичного завдання дисертаційного дослідження ...	68
1.7. Висновок до розділу 1.....	70
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ ТА УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМИ ПОТОКАМИ В МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 4G/5G.....	71
2.1. Удосконалена архітектура LTE мережі для систем мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління в умовах зростання трафіку Інтернету речей	71
2.1.1. Особливості функціонування мультистандартного M2M шлюза в процесі пріоритетного управління трафіком.....	74
2.1.2. Балансування навантаження між базовими станціями LTE з допомогою M2M шлюзів та технології Wi-Fi Direct.....	79
2.2. Алгоритм управління потоками даних на основі кластеризації, пріоритезації та агрегації M2M трафіку в мережі 4G/5G	82
2.3. Підвищення ефективності використання частотно-часових ресурсів шляхом мінімізації кількості службової інформації в процесі агрегації M2M трафіку.	89

2.4. Формалізація процесу розподілу частотно-часових ресурсів мережі LTE між UE та M2M/ІоТ для забезпечення QoS	94
2.5. Розроблення методу оптимального розподілу частотно-часових ресурсів в мережах стандарту LTE на основі адаптивного вибору ширини смуги радіочастот	107
2.5.1. Метод оптимального розподілу частотно-часових ресурсів за критерієм забезпечення гарантованої сталої в часі пропускної здатності потокам реального часу та мінімально допустимої пропускної здатності потоком не реального часу	112
2.5.2. Метод оптимального розподілу частотно-часових ресурсів за критерієм максимально допустимого часу передавання даних із сталим обсягом інформації на основі коефіцієнта заповненості послідовності кадрів	116
2.6. Висновок до розділу 2.....	121
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ	
ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ ЧАСТОТНО-ЧАСОВИХ РЕСУРСІВ В ГЕТЕРОГЕННІЙ МЕРЕЖІ 4G/5G	
122	
3.1. Аналітичне моделювання та дослідження процесу оптимізації розподілу ресурсів при формуванні кадрів на каналному рівні LTE	122
3.2. Імітаційне моделювання та дослідження ефективності використання методу оптимального розподілу частотно-часових ресурсів в мережі LTE.....	135
3.2.1. Розроблення та структурно-функціональний опис імітаційної моделі процесу розподілу радіоресурсів в межах функціонування однієї базової станції LTE	136
3.2.2. Дослідження мобільності абонентів гетерогенної мережі 4G/5G.....	145
3.2.3. Дослідження доступності ресурсів базової станції в залежності від розташування абонентів/M2M пристроїв	146
3.2.4. Дослідження можливостей забезпечення якості обслуговування для сервісів згенерованих мобільними користувачами та ІоТ/M2M датчиками згідно класичної архітектури та доповненої мультистандартним шлюзом	148
3.2.5. Можливість забезпечення надання сервісу шляхом аналізу необхідної пропускної здатності.....	151
3.2.6. Дослідження можливості зменшення відсотку «простою» субкадрів.....	157

3.3. Розробка імітаційної моделі гетерогенної мережі LTE із наданням сервісів M2M/IoT	160
3.4. Дослідження спектральної ефективності та параметрів QoS в межах архітектури LTE з використанням імітаційного моделювання.....	163
3.5. Висновок до розділу 3.....	169
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ ПІДХОДІВ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ УПРАВЛІННЯ ТРАФІКОМ ТА РОЗПОДІЛОМ РЕСУРСІВ У ПЕРСПЕКТИВНИХ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ	170
4.1. Концептуальна модель програмно-конфігурованої мережі мобільного зв'язку з наскрізним адаптивним управлінням ресурсами та інформаційними потоками.....	170
4.2. Оцінка ефективності функціонування удосконаленого алгоритму пріоритетного обслуговування пакетів у вузлах IP-орієнтованих мережах....	178
4.3. Науково -теоретичні підходи щодо реалізації програмно-конфігурованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі технологій SDN/NFV та SDR	181
4.3.1. Дослідження процесу організації наскрізного гарантування пропускну здатності фізичного каналу в концептуальній мережі мобільного зв'язку для забезпечення QoS	187
4.3.2. Дослідження завантаженості SDR фемтосоти як основного конвергентного пристрою на рівні доступу мережі користувачами технологій різного покоління мобільного зв'язку	193
4.4. Висновок до розділу 4.....	200
ВИСНОВКИ.....	201
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	204
ДОДАТОК А. Акти впровадження	219
ДОДАТОК Б. Фрагменти програмних кодів імітаційних моделей реалізації процесів функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку 4G/5G	223
ДОДАТОК В. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	236

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

M2M – Machine to Machine, машина до машини.

LTE – Long Term Evolution, довготерміновий розвиток.

IoT – Internet of Things, інтернет речей.

NB-IoT – Narrow Band Internet of Things. вузькосмуговий Інтернет речей.

GSM – Global System for Mobile Communications, глобальна система мобільного зв'язку.

HSPA – High-Speed Packet Access, розвинутий високошвидкісний пакетний доступ.

IPv4 – Internet Protocol version 4, четверта версія мережевого протоколу IP.

IPv6 – Internet Protocol version 6, нова версія мережевого протоколу IP.

D2D – Device-to-Device, пристрій до пристрою.

OFDM – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, мультиплексування з ортогональним частотним поділом сигналів .

SC-FDMA – Single Carrier Frequency Division Multiple Access, багаторазовий доступ з розподілом частоти однієї несучої.

GPRS – General Packet Radio Service, загальна пакетна радіослужба.

QoS – Quality of service, якість обслуговування.

E2E – End-to-End, кінець в кінець.

SLA – Service-level agreement, угода про рівень послуг.

GBR – Guaranteed Bit Rate, гарантована швидкість передачі даних.

non-GBR – no Guaranteed Bit Rate, не гарантована швидкість передачі даних.

QCI – QoS Class Identifier, ідентифікатор класу QoS.

CQI – Channel Quality Indicator Channel Quality Indicator, індикатор якості каналу.

TCP – Transmission Control Protocol, протокол керування передачею.

UDP – User Datagram Protocol, протокол датаграм користувача.

QPSK – Quadrature phase-shift keying, квадратурна фазова модуляція.

QAM – Quadrature Amplitude Modulation, квадратурна амплітудна модуляція.

MIMO – Multiple Input Multiple Output, системи зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами

FIFO – First In First Out, перший прийшов перший вийшов.

WFQ – Weighted Fair Queuing, механізм планування пакетних потоків даних з різними пріоритетами.

UE – User Equipment, обладнання користувача.

HSS – Home Subscriber Server, сервер абонентських даних.

VLR – Visitor Location Register, тимчасова база даних абонентів, які знаходяться в зоні дії певного MSC (Центр Мобільної Комутації).

HLR – The Home Location Register, база даних, що зберігає інформацію про кожного користувача мережі стільникового зв'язку.

AUC – Authentication Centre, призначений для аутентифікації кожної SIM карти.

EIR – Equipment Identification Register, реєстр ідентифікації обладнання.

S-GW – Serving Gateway, обслуговуючий шлюз.

P-GW – Packet Data Network Gateway, пакетний шлюз.

eNodeB – базова станція.

PCEF – policy and charging enforcement function, елемент мережі, що відповідає за застосування правил тарифікації.

MME – Mobility Management Entity, вузол управління мобільністю.

DPI – Deep Packet Inspection, глибока перевірка пакетів.

Wi-Fi – Wireless Fidelity, технологія безпроводної локальної мережі.

PDCCP – Packet Data Convergence Protocol, протокол конвергенції пакетних даних.

PDU – Protocol Data Unit, блок пакетних даних.

MAC рівень – Media Access Control, контроль доступу до медіа.

ACK – Acknowledge, підтвердження.

HARQ – Hybrid Automatic Repeat Request, запит на гібридне автоматичне повторення.

SR – Scheduling Request, запит на планування.

BSR – Buffer Status Report, звіт про статус буфера.

DCI – Downlink Control Information, інформація про управління низхідною лінією зв'язку.

RLC – Radio link control, контроль радіозв'язку.

C-RNTI – Radio Network Temporary Identifiers, тимчасові ідентифікатори радіомережі.

FLC – Fuzzy Logic Controller, контролер нечіткої логіки.

FLT – Fuzzy Logic Toolbox, пакет нечіткої логіки в середовищі MatLab.

ToS – Type of Service, тип обслуговування.

DSCP – Differentiated Services Code Point, поле коду диференційованої послуги.

NPDSCH – Narrowband Physical Downlink Shared Channel, вузькосмуговий фізичний мультиплексний канал передачі DL.

NPBCH – Narrowband Physical Broadcast Channel, вузькосмуговий фізичний радіомовний каналу.

NPDCCH – Narrowband Physical Downlink Control Channel, вузькосмуговий фізичний контрольний канал передачі.

NPSS – Narrowband Primary Synchronization Signal, вузькосмуговий сигнал первинної синхронізації.

NSSS – Narrowband Secondary Synchronization Signal, вузькосмуговий сигнал вторинної синхронізації.

NRS – Narrowband Reference Signal, вузькосмуговий опорний сигнал.

PUSCH – Physical Uplink Shared Channel, фізичний канал передачі користувальницького трафіку і сигналізації UCI.

PUCCH – Physical Uplink Control Channel, фізичний канал передачі сигналізації UCI в відсутності каналу PUSCH.

SRS – Sounding Reference Signal, звуковий опорний сигнал.

UCI – Uplink Control Information, інформація про контроль висхідної лінії зв'язку.

PDSCH – Physical Downlink Shared Channel, фізичний канал для передачі інформації "вниз" з поділом користувачів.

PBCH – Physical Broadcast Channel, фізичний канал передачі широкомовної інформації.

PCFICH – Physical Control Format Indicator Channel, фізичний канал, який несе CFI (індикатор формату управління) .

PHICH – Physical Hybrid Automatic Repeat Request Indicator Channel, це канал управління по низхідній лінії зв'язку LTE.

PDCCH – Physical Downlink Control Channel, фізичний канал управління "вниз". Використовується для передачі інформації про призначення ресурсів для користувача терміналів.

P-SS – Primary Synchronization Signal, сигнал первинної синхронізації.

S-SS – сигнал первинної синхронізації, сигнал вторинної синхронізації.

EPS – Evolved Packet System, Еволюційна пакетна система.

ARP – Allocation and Retention Priority, пріоритетність призначення і утримання каналів;

MBR – Maximum Bit Rate, максимальна швидкість передачі;

APN-AMBR – Access Point Name Aggregate Maximum Bit Rate, загальна максимальна швидкість передачі для однієї точки доступу;

UE-AMBR – User Equipment Aggregate Maximum Bit Rate, загальна максимальна швидкість передачі для одного користувацького обладнання.

PHB – Per-Hop Behavior, покрокової політики обслуговування.

VBR – Variable Bit Rate, змінною бітовою швидкістю.

SDR – Software Defined Radio, програмно-конфігурована радіосистема.

SDN – Software Defined Networking, програмно-конфігурована мережа.

NFV – Network Functions Virtualization, це конкретні програмні компоненти, що реалізують конкретні мережеві функції

API – Application Programming Interface, інтерфейс програмування програм.

ВСТУП

Актуальність теми. Безпроводний спосіб комунікації став невід'ємною частиною повсякденного життя будь-якого власника мобільного пристрою чи розумного датчика. Підключення цих пристроїв та датчиків до мережі передавання даних змінює звичне уявлення про Інтернет в цілому. Адже вони можуть здійснювати обмін даними між собою в автоматичному режимі без участі людини, тим самим генеруючи трафік міжмашинної взаємодії (Machine-to-Machine, M2M).

Загальносвітові тенденції на телекомунікаційному ринку показують, що безпроводні мережі зв'язку стають одним з ключових елементів в реалізації парадигми Інтернету речей (англ. Internet of Things, IoT). В умовах швидкого зростання трафіку мобільного передавання даних, популярності IoT та M2M, оператори мобільного зв'язку постійно працюють над покращенням якості надання послуг, розвиваючи мережі 4G в напрямку майбутніх програмно-конфігурованих гетерогенних мереж 5G, що базуються на технології LTE. Сучасні можливості мереж мобільного зв'язку 4G/5G дають змогу передавати трафік на високих швидкостях. Однак, вони ще не повністю готові якісно обслуговувати зростаючі обсяги інформації від масових підключень мобільних та IoT пристроїв. 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.

Проблематика ефективного розподілу ресурсів мереж мобільного зв'язку 4G/5G активно досліджувались такими провідними українськими та

зарубіжними вченими як В.М. Безрук, М.М. Климаш, Л.Н. Беркман, А.І. Семенко, С. Г. Бунін, І. П. Лісовий, К. С. Сундучков, Л. С. Глоба, В.О. Пелішок, В. Г. Сайко, М. Jo, Н. HwaChen, М. Dohler, М. Haenngi, та багатьма іншими. Незважаючи на велику кількість різноманітних рішень для мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління, нерозв'язаними досі залишаються завдання оптимального планування та розподілу частотно-часових ресурсів між сервісами Інтернету речей та трафіку мобільних користувачів з метою забезпечення необхідної якості обслуговування.

Розв'язання завдань планування розподілом радіоресурсів, призначення пріоритетів доступу залежно від типу трафіку із заданими вимогами до якості обслуговування в мережах четвертого та п'ятого покоління займаються модулі управління радіоресурсами, які називаються планувальниками (англ. Schedulers). Існуючі методи розподілу радіоресурсів в мережах LTE, які були історично оптимізовані для обслуговування користувачів традиційних послуг зв'язку володіють недостатньою гнучкістю розподілу в умовах зростаючої кількості вхідних запитів з різними вимогами до якості обслуговування, зокрема сервісів Інтернету речей.

Саме тому, у зв'язку із стрімким розвитком технологій Інтернету речей та постійним зростанням кількості користувачів сервісів потокового контенту актуальним науково-практичним завданням є підвищення ефективності використання ресурсів та якості обслуговування в системах мобільного зв'язку 4G/5G шляхом удосконалення моделей гнучкого управління інформаційними потоками та методів оптимального розподілу мережевих ресурсів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напряму кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» - «Інфокомунікаційні системи та мережі», в межах низки держбюджетних науково-дослідних робіт: «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-

конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (ДБ/5G), (№ держреєстрації 0117U004449, (2017–2018 рр.); «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні» (ДБ/LTE-U), (№ держреєстрації 0117U007177, (2018–2019 рр.)); «Розроблення новітньої децентралізованої мережі мобільного зв'язку на основі блокчейн-архітектури та штучного інтелекту для впровадження технологій 5G/6G в Україні» (ДБ/Блокчейн), (№ держреєстрації 0120U100674, (2020-2022 рр.); «Розроблення та інтеграція інформаційних і комунікаційних технологій для побудови системи моніторингу та управління міською інфраструктурою» (ДБ/SmartCity), (№ держреєстрації 0120U102193, (2020-2022 рр.) – *відповідальний виконавець*).

Результати дисертаційної роботи використані в ході виконання госпдоговірної роботи «Розробка компонентів системи моніторингу та управління якістю надання послуг в інформаційних мережах з використанням технологій машинного навчання та мережної аналітики» (ГД №0655) ТОВ «МаксіТех» (15.10.2020р. – 15.12.2020 р.).

Мета і завдання дослідження. 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.

Досягнення поставленої мети здійснюється розв'язанням таких завдань:

1. Аналіз існуючих методів розподілу частотно-часових ресурсів та управління інформаційними потоками у сучасних мережах мобільного зв'язку стандарту LTE.

2. Удосконалення архітектури LTE мережі для систем мобільного зв'язку 4G/5G в умовах зростання трафіку Інтернету речей.

3. Розроблення алгоритму управління потоками даних на основі кластеризації, пріоритезації та агрегації M2M трафіку в мережі 4G/5G.

4. Розроблення методу оптимального розподілу частотно-часових ресурсів в мережах стандарту LTE.

5. Моделювання та дослідження ефективності використання запропонованих рішень в гетерогенній мережі мобільного зв'язку для якісного надання IoT/M2M послуг.

6. Побудова концептуальної моделі програмно-конфігурованої мережі мобільного зв'язку із наскрізним адаптивним управлінням мережними ресурсами та інформаційними потоками для забезпечення необхідної якості надання послуг.

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

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

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

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

1. Розвинуто метод розподілу частотно-часових ресурсів в мережах стандарту LTE, який, на відміну від відомих, базується на адаптивному виборі ширини смуги радіочастот в залежності від вимог якості обслуговування, а також на пріоритетній агрегації трафіку у шлюзах M2M, що дало змогу підвищити ефективність використання ліцензійних радіоресурсів шляхом оптимізації процесу формування кадрів на каналному рівні LTE та зменшення в них частки службового трафіку.

2. Набула подальшого розвитку імітаційна модель процесу функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку, яка, на відміну від відомих, враховує основні технічні параметри функціонування стандарту LTE

для створення реальних умов дослідження та автоматизує запропонований метод оптимального розподілу частотно-часових ресурсів між трафіком мобільних користувачів та M2M/IoT пристроїв з метою забезпечення необхідної якості обслуговування, що дало змогу з урахуванням обмеженості спектральних ресурсів оцінити ефективність розроблених рішень в процесі оптимізації радіоресурсів мережі у порівнянні із відомими методами.

3. Вперше розроблено концептуальну модель гетерогенної мережі мобільного зв'язку 4G/5G на основі стандарту LTE, яка, на відміну від відомих, забезпечує 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, що дало змогу гарантувати часові параметри якості обслуговування з кінця в кінець в умовах короткочасної нестабільності характеристик безпроводних каналів зв'язку.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх безпосереднього застосування в існуючих мережах мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління для підвищення їх спектральної ефективності та якості обслуговування в умовах масового зростання M2M/IoT трафіку.

1. Розроблений метод оптимального розподілу ресурсів для LTE мереж нового покоління дав змогу в залежності від різних ситуацій моделювання (без врахування та з врахуванням пріоритетів даних) підвищити від 4% до 13% ефективність використання частотно-часових ресурсів в процесі формування кадрів на каналному рівні LTE, в умовах одночасного використання ширини смуги каналу 1,4 МГц та 3 МГц.

2. 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 %.

3. На основі розробленої імітаційної моделі гетерогенної мережі LTE/NB-IoT встановлено, що використання пріоритетизації IoT трафіку в процесі планування частотно-часових ресурсів у вузькосмуговому спектрі NB-IoT, дає змогу зменшити середню затримку передавання повідомлень реального часу до 2,12 разів у порівнянні з існуючим методом пропорційного розподілу ресурсів в умовах високого навантаження.

4. Удосконалення алгоритму пріоритетного обслуговування черг пакетів у вузлах зовнішніх IP-орієнтованих мережах шляхом аналізу модифікованих шлюзом P-GW заголовків пакетів поля DSCP, що вказують на критичність пріоритету пакетів щодо тривалості обслуговування в IP мережі дало змогу гарантувати часові параметри якості обслуговування потокового трафіку реального часу з кінця в кінець в умовах короткочасної нестабільності характеристик безпроводних каналів зв'язку. Зокрема у порівнянні із відомим алгоритмом пріоритетного обслуговування черг запропонований алгоритм зменшує до 30% затримку та джитер пакетів в процесі обслуговування потокового трафіку реального часу.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані у навчальному процесі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка», зокрема для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» в курсі лекцій з дисципліни «Побудова та протоколи гетерогенних мереж мобільного зв'язку».

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою покращення якості обслуговування в телекомунікаційних корпоративних мережах Науково-дослідного інституту інтелектуальних комп'ютерних систем, ТОВ «Телекомунікаційна компанія», що підтверджено актами впровадження

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, внесок Бешлей Г.В. є вирішальним, зокрема авторові належать (*нумерація згідно Додатку В*): у роботах [21, 22, 25, 27, 28] – удосконалення архітектури

LTE мережі для систем мобільного зв'язку 4G/5G в умовах зростання трафіку Інтернету речей, [8, 23] – розроблення алгоритму управління потоками даних на основі кластеризації, пріоритезації та агрегації M2M трафіку в мережі 4G/5G, [12-14, 29, 30] – розроблення методу оптимального розподілу частотно-часових ресурсів в мережах стандарту LTE, [3, 6, 18-20] – розроблення імітаційної моделі гетерогенної мобільної мережі LTE/NB-IoT/M2M, [1, 4, 5, 7, 11] – удосконалення алгоритму пріоритетного обслуговування черг пакетів у вузлах зовнішніх IP-орієнтованих мережах та розроблення моделі програмно-конфігурованого маршрутизатора, [2, 8, 9, 10, 15-17, 25, 26] – моделювання та дослідження методів управління мережними ресурсами та якістю обслуговування.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на 17-ох міжнародних і державних науково-технічних конференціях та наукових семінарах: Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» (м. Львів-Славське 2016, 2018, 2020 рр.); IEEE Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (м. Львів, 2019 р.); International IEEE Conferences on Advanced Information and Communication Technologie (м. Львів, 2015, 2017, 2019 рр.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці» (м. Львів-Поляна, 2017, 2019 рр.); Міжнародних конференціях з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (м. Одеса, 2017, 2018 рр.); IEEE 4th International symposium on wireless systems within the international conferences on intelligent data acquisition and advanced computing systems (м. Львів, 2018р.); 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (м. Харків 2017); 5-ій міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (2016 р., м.

Чернівці); 1-й міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем” (2018 р., м. Київ); 7-й міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій” (2014 р., м. Запоріжжя); 6-му науково-технічному симпозиумі “Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій” (2013 р., м. Запоріжжя). Крім цього, дисертаційна робота у повному обсязі представлена на наукових семінарах кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка».

Публікації. За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 30 наукових праць, з них 6 статей у наукових фахових виданнях України та 5 статей у наукових періодичних виданнях інших держав (з яких 3 входять до наукометричних баз Scopus/Web of Science з індексом цитування (імпаکت-фактором, квартиль Q1-Q2)), 19 у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій, з них індексованих у наукометричній базі Scopus та Web of Science – 14.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з переліку умовних скорочень, вступу 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і 3 додатків. Загальний обсяг роботи складає 240 сторінок друкарського тексту, із них 8 сторінок вступу, 177 сторінок основного тексту, 114 рисунків, 16 таблиць, список використаних джерел із 113 найменувань, 3 додатки на 22 сторінках. Додатки містять програмні коди імітаційних моделей, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список праць автора.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ, ПРОБЛЕМ І ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ МЕРЕЖ 4G/5G В УМОВАХ ЗРОСТАННЯ ТРАФІКУ

1.1. Аналіз сучасного стану безпроводних мереж мобільного зв'язку в умовах швидкого зростання трафіку Інтернету речей та кількості користувачів потокового контенту

Розвиток технологій передавання даних свідчить про те, що безпроводні мережі зв'язку стають одними з ключових елементів в реалізації парадигми Інтернет-речей (Internet of Things) [1-3]. Передавання даних безпроводними мережами має суттєві переваги перед провідним, основними із яких є можливість здійснення передавання даних в довільному місці, в будь-який момент часу та підключатися до будь-якого пристрою. Підключення до будь-якого пристрою, наразі забезпечується особливостями міжмашинної взаємодії.

Багато сценаріїв використання IoT-технологій, які зараз прийнято відносити до парадигми Інтернету речей, по суті, є звичайними M2M-підключеннями (Machine-to-Machine): вони реалізують збір, управління і візуалізацію даних для потреб одного підприємства без участі людини. Визначення міжмашинної комунікації M2M (Machine to Machine) досить просте [4]. Воно відбувається з технологій телеметрії і означає передачу даних між двома пристроями, як правило, безпосередньо, без обробки деінде. Це поняття було відомо ще до появи Інтернету. Однак, канали Інтернет при передаванні даних M2M можуть використовуватися як транспорт [5-7].

Саме це і вносить плутанину, тому що навіть просунуті фахівці в IT та Інтернет-технологіях часто не бачать різниці між IoT і M2M, вважаючи ці поняття синонімами, які дають зрозуміти передачу даних між двома машинами через Інтернет без участі людини. Ідея IoT виникла на базі M2M, збагативши цю технологію новими функціями і можливостями. При цьому Інтернет використовується не тільки як транспорт, але також і як система для взаємодії

безлічі подібних пристроїв, об'єднаних в єдину систему, часто працює в декількох різних середовищах.

У реальному житті можна навести приклад телемедицини. Наприклад, якщо сенсор, що вимірює пульс або тиск або вміст цукру в крові людини, посилає дані на віддалений додаток, за яким лікар визначає чи потрібно приділити увагу даному пацієнтові, то це типовий випадок M2M. А якщо такий медичний сенсор інтегрований з інтерактивним центром медикаментів, який буде нагадувати пацієнту про час прийому ліків, або посылати повідомлення на смартфони його близьких з таким нагадуванням, то це вже є підходом, близьким до IoT. Тому, IoT в цьому сенсі можна назвати розширеним M2M, зі збагаченим функціоналом.

Можна також привести всім відомий сервіс моніторингу ситуації на дорогах як хороший приклад IoT. У разі M2M тільки один додаток навігатора посилає дані про швидкість руху однієї машини по конкретній вулиці. За даними одного автомобіля додаток інтерактивних карт на смартфоні не зможе відобразити ситуацію на вулицях міста. Ми зможемо побачити, що в даний момент часу якась машина їде по даній вулиці зі швидкістю, скажімо 50 км/год. Якщо така інформація отримується та обробляється від безлічі навігаторів з безлічі автомобілів, то при цьому стає можливим бачити те, що ми звикли бачити на екранах смартфонів в додатках, наприклад, Гугл-карти із рівнем завантаження доріг. IoT - підключення інтелектуальних пристроїв до Інтернет мережі для збору даних, їх аналізу та прийняття рішень. M2M - пряме з'єднання між двома пристроями. Таким чином, у роботі приймемо, що IoT система включає в собі M2M, відповідно, дані генеровані M2M та IoT пристроями вважатимемо тотожними, але з деякими відмінностями, зокрема приймемо, що IoT пристрій містить в собі незалежну SIM-оператора мобільного зв'язку LTE, що забезпечує безпроводне передавання даних через таку технологію, як NB-IoT, LTE-M, відповідно, M2M пристрій без SIM картки [9-11].

Взаємодія між різними технологічними пристроями без участі людини вже активно застосовується в сферах безпеки і транспорту, а також в галузі охорони здоров'я. Використання принципу міжмашинної передачі даних дає змогу автоматизувати контроль і оптимізацію маршрутів транспортних засобів з урахуванням дорожньої обстановки. Із використанням безпроводних мереж зв'язку відкриваються нові перспективи в області надання віддаленої медичної допомоги. Постійний моніторинг життєво важливих показників здоров'я людини дозволить істотно скоротити час надання необхідної медичної допомоги.

Мережа IoT/M2M набагато ширша, ніж може здатися на перший погляд [8]. Технологію давно і дуже активно використовують по всьому світу і в самих різних сферах (рис.1.1).

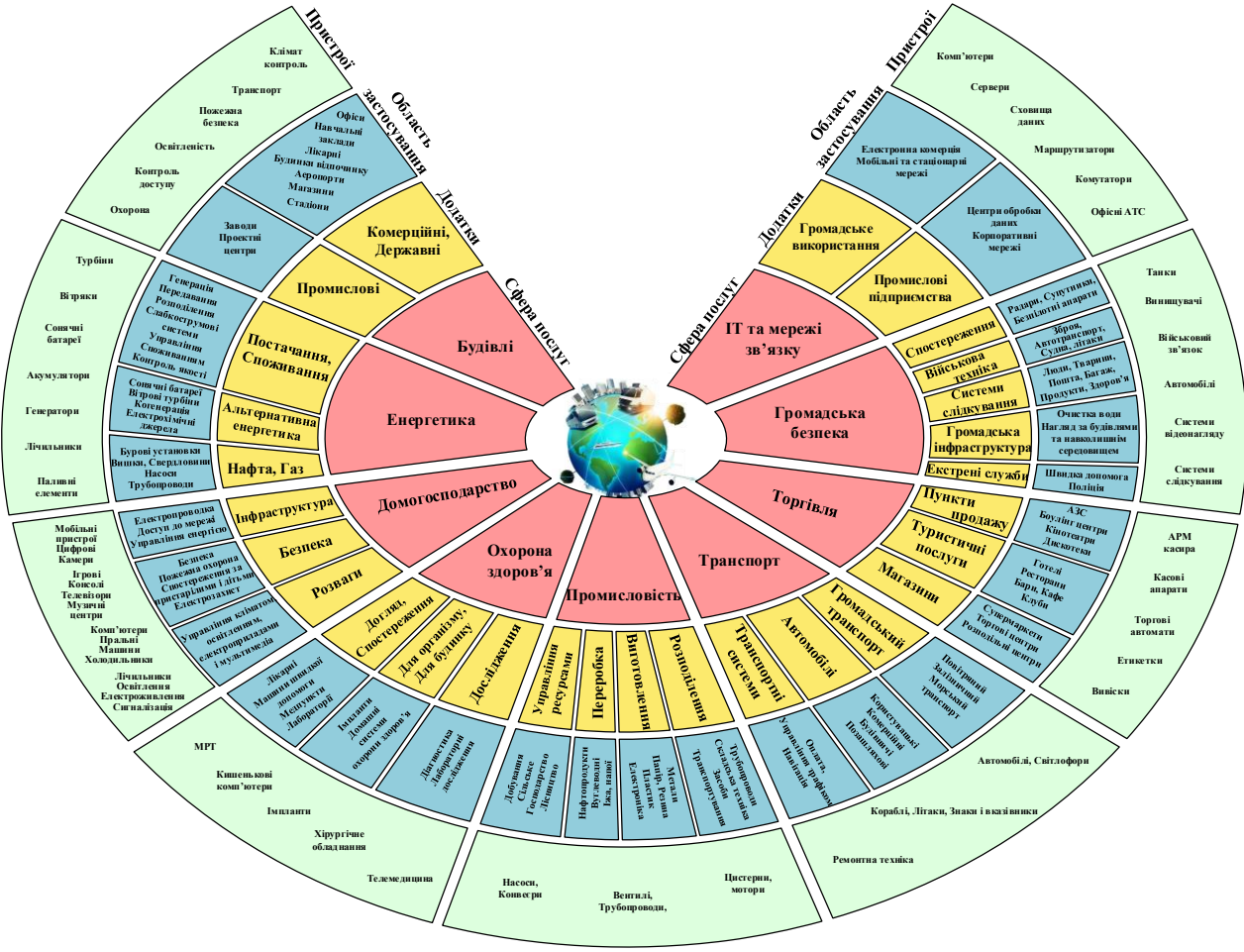
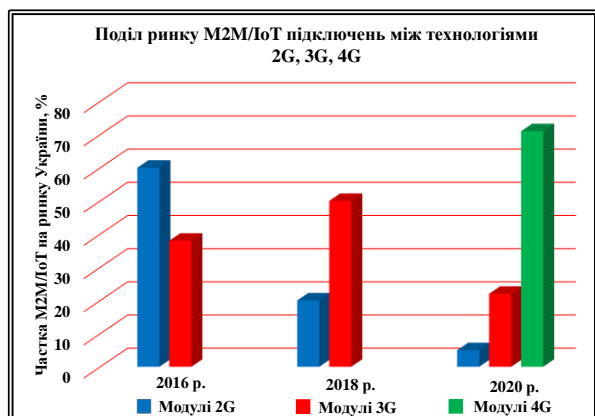


Рис. 1.1. Проникність розумних датчиків у сфери людського життя

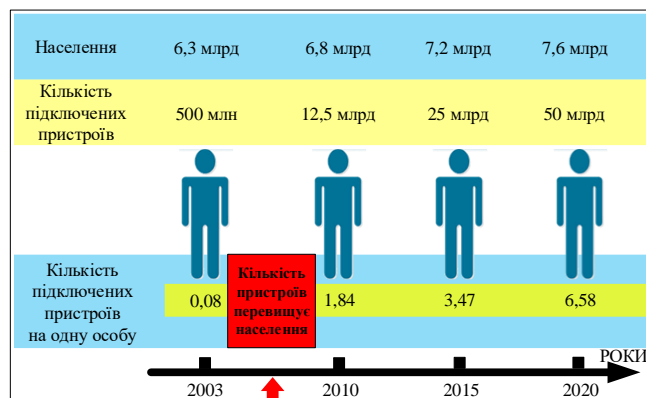
Одним з перспективних і динамічних ринків послуг для мобільних операторів, може стати ринок послуг M2M або IoT сервіси. LTE-мережі мають ряд переваг, які вже в найближчому майбутньому приведуть до переходу M2M-користувачів від технологій 2G/3G до 4G [12]. Швидкість передачі даних в мережах LTE, як відомо, в сотні разів вище, ніж в мережах 2G, і може забезпечити передачу відео високої чіткості, необхідну в системах громадської безпеки та ряді комерційних додатків. Іншою, мабуть, більш важливою перевагою мереж LTE є в 10 разів менші в порівнянні з GSM затримки відгуку (час, за який сигнал від пристрою M2M доходить до сервера через мережу мобільного оператора і повертається назад). Низькі затримки важливі для M2M-додатків, що працюють в реальному часі, для контролю чутливого обладнання, а також для систем сигналізації та управління промисловим обладнанням. Велика перевага в порівнянні з мережами 2G/3G в умовах передачі даних з асиметричним трафіком в мережах M2M досягається в мережах TD-LTE завдяки можливості гнучкої зміни розподілу мережевих ресурсів за рахунок гнучкого використання числа тайм-слотів і, відповідно, зміни симетричності трафіку в лінії вниз і вгору [13-15].

Ще однією перевагою технології LTE є більш низькі витрати на обслуговування M2M-мережі в перспективі. Завдяки тому, що технологія LTE повністю заснована на комутації пакетів і працює по протоколу IP, мережі M2M на базі LTE простіші та дешевші в побудові, експлуатації та розширенні. Крім того, для мереж LTE специфіковані 44 частотні діапазони, вони мають більш високу спектральну ефективність в порівнянні з технологіями GSM і HSPA (GSM - 1-1,5 біт/с/Гц, HSPA - 2,2 біт/с/Гц, LTE - 5 біт/с/Гц). Всі ці особливості дають змогу знизити капітальні витрати і експлуатаційні витрати на мобільну мережу і, як наслідок, вартість передачі одного біта даних. Мережі LTE відрізняються високою масштабованістю по абонентській базі і впроваджуються сьогодні з підтримкою IPv6-адресації [16]. Це дуже важлива характеристика, оскільки запас доступних публічних IPv4-адрес швидко

скорочується, а кількість M2M-пристроїв, що працюють на основі LTE в Україні буде і далі постійно зростати (рис. 1.2 а).



а)



б)

Рис 1.2. Зростання кількості пристроїв, що працюють на основі LTE а) та кількості пристроїв в розрахунку на одну людину б)

Використання мереж LTE для взаємодії елементів M2M має принести операторам додаткові доходи і надати імпульс подальшого зростання інвестицій. Оператори безпроводного зв'язку оновлюють обладнання для того, щоб не відставати від провідних країн в розвитку мобільних мереж. Однак основною причиною, як збільшення швидкості передавання так і якості надання послуг, є зростаюча кількість пристроїв, що припадає на одну людину.

Згідно з дослідженнями компанії Cisco (рис. 1.2 б) в 2010 році кількість смартфонів і планшетів, що підключені до мережі Інтернет в розрахунку на одну людину становить майже двом. У 2020 року ця цифра сягнула 6,58 пристроїв на одну людину, а загальна кількість мобільних засобів зв'язку, що обмінювалися даними використовуючи мережу Інтернет перевищить позначку в 50 млрд.

Згідно щорічного дослідження компанії Cisco сумарний обсяг трафіку, який генерується 22 мільйонами переносних M2M-модулів, склав в 2013 році 1,7 Пбайт в місяць. У зазначеному дослідженні також представлений прогноз, згідно з яким один M2M-пристрій в 2022 році буде генерувати більше 450

Мбайт трафіку в місяць, а сумарний обсяг аналогічного трафіку для всіх М2М-пристроїв повинен перевищити 907 Пбайт (рис.1.3).

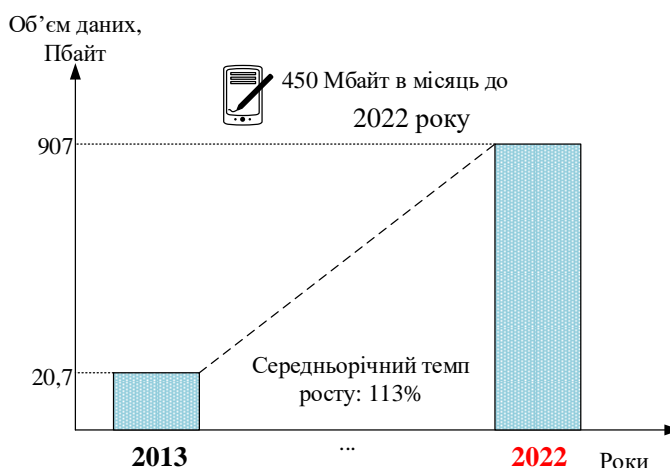


Рис. 1.3. Прогноз зростання М2М трафіку в період від 2013 до 2018 року

Мережі мобільного зв'язку пройшли складний шлях еволюційного розвитку, на протязі якого надавали абонентам можливість обмінюватися інформацією на віддалі.

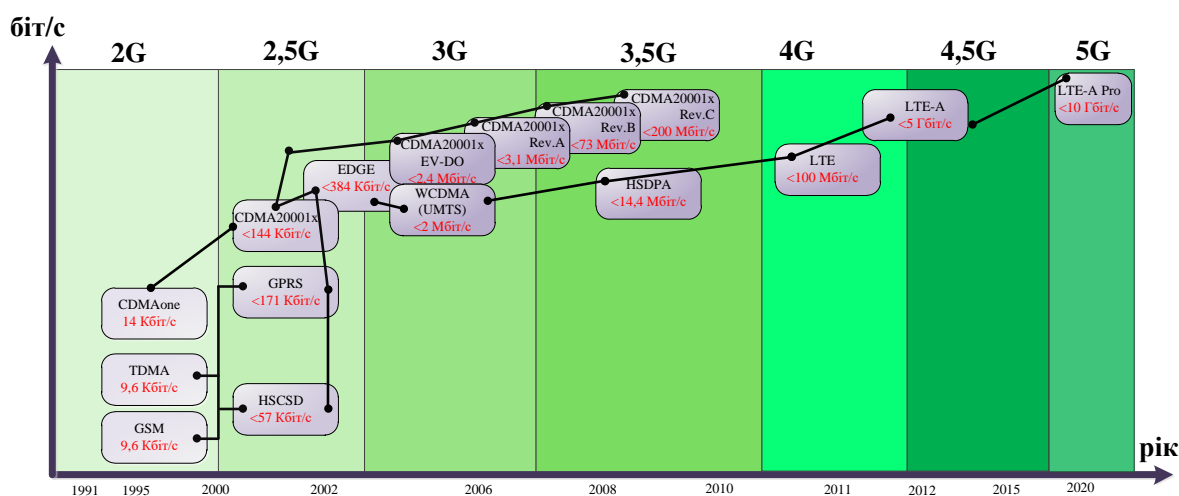


Рис.1.4. Еволюція технологій мобільного зв'язку

З роками різновид трафіку, а разом із тим, вимоги до пропускної здатності змінювалися, вимагаючи при цьому удосконалення мереж для забезпечення необхідної якості обслуговування з кінця в кінець.

Згідно досліджень компанії Ericson зазначається, що сьогодні існує цілий ряд додатків, які вимагають дуже малих часових затримок в мережі

(дистанційні вимірювання, забезпечення безпеки дорожнього руху, керування виробничими процесами і т. д.), високого рівня надійності мережі (управління критичною інфраструктурою - мережі передачі електроенергії, індустриальний контроль і забезпечення таких життєво важливих соціальних функцій як транспорт, телемедицина, управління «розумним» містом і будинком), а також відповідних форматів швидкої передачі різних обсягів даних (великих об'ємів - при віддаленому відеоспостереженні, малих - при відстеженні руху вантажів і т. д.) (рис. 1.5).

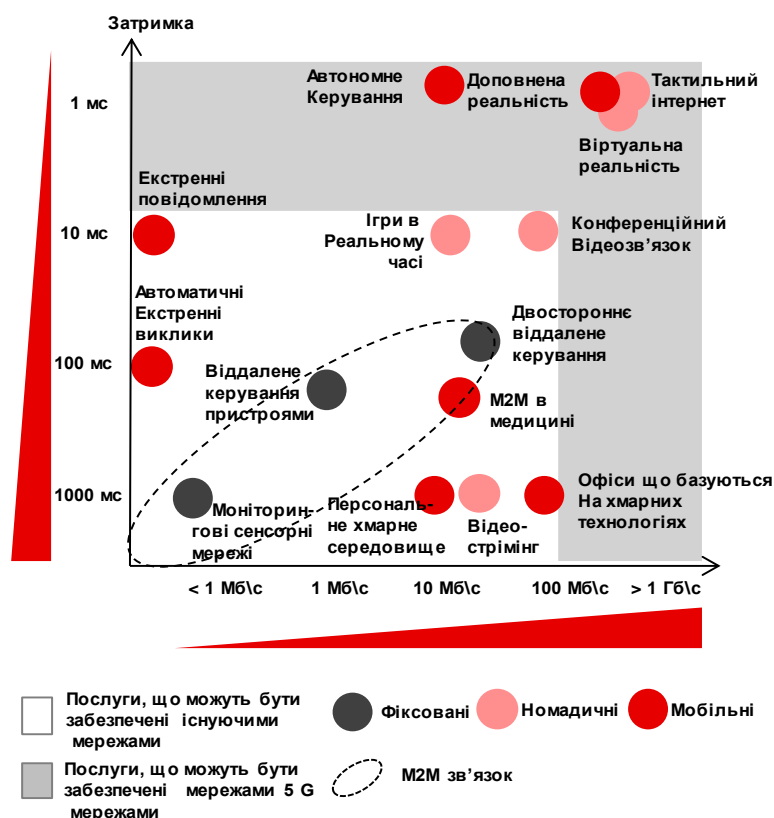


Рис.1.5. Необхідність у високошвидкісних мобільних мережах 4G/5G

У розвитку цієї позиції виділяється ряд конкретних вимог, які не можуть бути задоволені за допомогою існуючих мереж зв'язку. До них відносяться:

- швидкість доставки даних користувача в будь-якій точці в сотні Мбіт в секунду;

– надвисока пропускна здатність (кілька Гбіт на секунду) в певних сценаріях: це може бути досягнуто в мережах зі надщільною архітектурою при дуже широкій смузі радіоканалу (кілька сотень МГц);

– з'єднання великої кількості комунікаційних пристроїв машинного типу, що мають низьку споживану потужність. У стандартах LTE цей аспект вже розглядається, але поки, на даній стадії, розвинути LTE таким чином, щоб виконати всі додатки з їх особливими специфічними вимогами, буде важко - потрібно альтернативні технології та рішення, які повсюдно забезпечать можливість зменшення сигналізаційного навантаження на безпроводні канали зв'язку з обмеженим споживанням енергії;

– найближча комунікація, коли необхідно підтримувати з'єднання між близько розташованими користувачами або об'єктами (наприклад, між транспортними засобами при забезпеченні безпеки дорожнього руху). Така комунікація може бути більш ефективною, якщо обмін інформацією здійснюється безпосередньо між пристроями (Device-to-Device, D2D), минаючи мережеву архітектуру [17-20];

– ефективне використання обмежених ліцензійних радіоресурсів шляхом розробки нових методів та моделей оптимального розподілу ресурсів, що в перспективі вплине на редизайн мереж радіодоступу 4G в напрямку 5G.

1.2. Необхідність та перспективи розвитку мереж мобільного зв'язку в напрямку 4G/5G

Уже в кінці січня 2018 року в Україні запущено в експлуатацію мережі четвертого покоління стандарту LTE. Сьогодні мобільні оператори активно ведуть підготовку до переходу на 5G, опрацьовують нові тарифні плани, що включають надання послуг IoT, вивчають можливості для впровадження 5G на своїх мобільних мережах LTE. Стандарт мобільного зв'язку LTE, в основі якого покладено технологію OFDM, забезпечує передавання даних одночасно багатьом користувачам за рахунок ортогональності сигналів [21-23]. Для

надання послуг зв'язку у густозаселених районах та в місцях масового скупчення абонентів та M2M пристроїв, передбачено розгортання фемтокомірок, базова станція якої підпорядковуватиметься головній (макрокомірці) по протоколу X2.

Більшість передових країн розвивають, а в деяких країнах розвинули інфраструктуру четвертого покоління LTE до мережі 5G, яка покликана змінити повсякденне життя суспільства і зробити можливим масове застосування технологій Інтернету речей (IoT). Одним із них є комунікація Vehicle-to-vehicle, де автомобілі згідно цієї технології будуть обмінюватись інформацією про стан дорожнього руху.

На перших етапах нова технологія 5G в Україні. також буде впроваджуватися на основі інфраструктури 4G (LTE). І це хороша новина для операторів (Водафон, Київстар, Лайфсел) : задача будівництва мереж п'ятого покоління не буде занадто складною і витратною. Еволюційний перехід до 5G дасть час, щоб окупити витрати, які пішли на розгортання мереж 4G. Інфраструктура LTE в п'ятому поколінні буде доповнена інноваційними розробками радіодоступу, новими підходами і методами управління якістю обслуговування і механізмами пріоритезації трафіку при впровадженні IoT. На фізичному рівні будуть використовуватися мультистандартні антени, комплекси з великою кількістю антенних елементів, що підтримують широкий спектр частот, поряд з програмними рішеннями, що поліпшують координацію роботи базових станцій.

Сучасні технології безпроводних мереж зв'язку надають можливість передавання значних за обсягом даних. Якщо порівнювати зі можливостями технологій попередніх поколінь, то можна наголосити на тому, що використання 4G для обміну інформацією має суттєву перевагу над технологіями попередніх поколінь. Основною відмінністю є забезпечення користувачів більшою швидкістю передавання і водночас більшою проникністю в сфері їх життя. Загалом технологія мережі четвертого покоління

служить основною для розвитку парадигми Інтернет-речей у контексті 5G. Консорціум 3GPP постійно вносить корективи до стандарту LTE для збільшення гнучкості надання сервісів. Однак їх недостатньо для задоволення потреб користувачів. Постійне зростання кількості пристроїв, із можливостями використання для передавання даних технології безпроводного зв'язку четвертого покоління, а також генерованого ними трафіку суттєво впливає на кількість відмов в обслуговуванні, у зв'язку із обмеженістю частотного ресурсу.

Широкомасштабна проникність розумних датчиків в сфері людської діяльності спрощує життя людям різних професій [24,25], сприяє розвитку і процвітанню країни. Однак сучасний стан мереж четвертого покоління не надає гарантій такого широкомасштабного обслуговування користувацьких пристроїв та розумних датчиків. Частина користувачів мобільної мережі ще й досі використовує для спілкування та серфінгу Інтернетом технологію 3G. Це пов'язано, насамперед, з масовим переходом на технологію LTE, яка володіє ще не достатньою гнучкістю розподілу мережевих ресурсів між всіма охочими до передавання даних користувачами. В той час, коли частина користувачів намагається використовувати сучасні технології передавання даних, інші – не поспішають це робити. Адже перехід користувачів на технологію LTE значно розвантажує частотний ресурс мережі 3G, що стає поштовхом до підвищення якості обслуговування. Наразі цим користувачам достатньо використовувати для передавання даних IoT технологію GSM/GPRS [26-28].

Однак загальносвітова тенденція розвитку безпроводних технологій не стоїть на місці, як і розвиток нових послуг. В майбутньому передбачається зростання потреб саме в високошвидкісних безпроводних каналах зв'язку. Це пов'язано з тим, що M2M потрібно для передачі високоякісного голосового трафіку та відеоінформації в потоковому режимі. Це і не дивно. Адже, ще на початку цього століття користувачі мобільних мереж тільки мріяли про передавання даних в режимі реального часу. Зараз цим вже нікого не здивуєш.

Враховуючи той факт, що кожен користувач рано чи пізно забажає максимально спростити собі життя шляхом використання розумних пристроїв, які нададуть йому можливість обмінюватися інформацією на відстані, потрібно удосконалювати існуючі методи управління інформаційними потоками та розподілу мережевими ресурсами та займатися пошуком нових способів гнучкого надання ресурсу через сучасні мережі мобільного зв'язку.

За масового використання безпроводного способу передавання даних мережі все більше стають гетерогенними [29] (рис. 1.6).

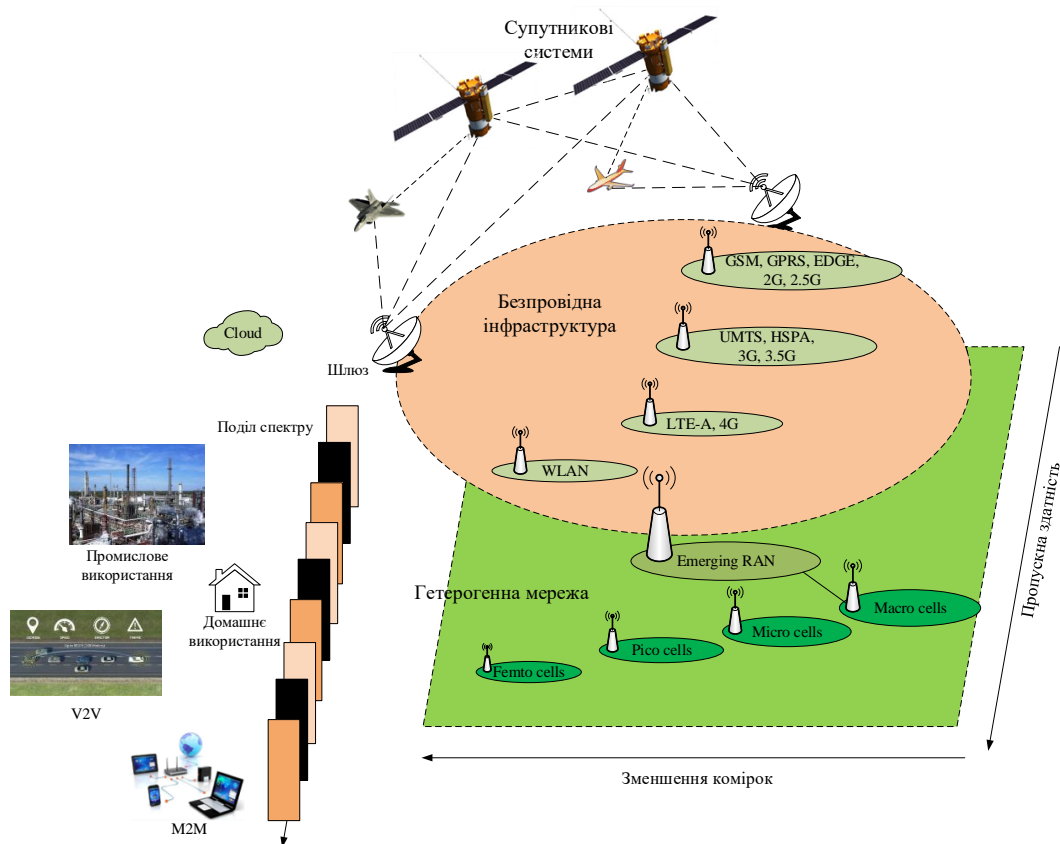


Рис. 1.6. Сучасний стан гетерогенної мережі мобільного зв'язку

Базова станції мереж 4G/5G для обслуговування користувачів та M2M/IoT пристроїв виділяє частотно-часові ресурси. При цьому вона враховує вимоги до трафіку. Мобільні телефони, планшети та IoT/M2M пристрої передають різний трафік, починаючи від вимірюного значення температури навколишнього середовища і аж до потокового відео в режимі реального часу. Враховуючи це, базова станція виділяє вузький або широкий спектр для передавання даних.

При цьому разом із корисними даними передається і службова частина навантаження. Враховуючи, що потокове відео вимагає на порядок більшої кількості ресурсів, ніж передавання простого SMS повідомлення чи виміряного значення температури, відношення сигналізаційних даних до загальної кількості буде різним. Згадане відношення коливатиметься в залежності від ширини каналу від 24% при 1,4 МГц і до 19% при 20 МГц. Таким чином, ефективність використання базовою станцією ресурсів відрізняється при передаванні малої та великої кількості даних. Відповідно на сигналізаційні дані затрачається орієнтовно 25% виділених ресурсів. Тому при виділенні ресурсів для передавання корисної інформації, слід враховувати додаткову необхідність у ресурсних блоках для сигналів сигналізації. Основна проблема, з якою стикаються оператори полягає в невпинному збільшенні кількості M2M пристроїв, що мають можливість комунікації один з одним, тим самим викликати перевантаження мережі. Згідно прогнозів Machina Research (рис. 1.7) на 2022 рік передбачається порядку 2,5 млрд підключень в мобільній LTE мережі.

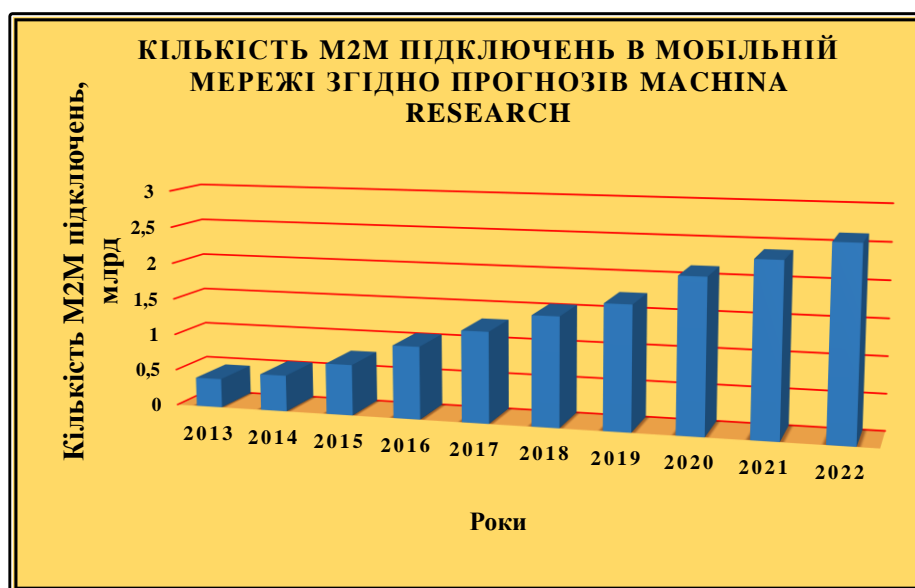


Рис. 1.7. Затрати виділеної пропускної здатності на сигнали керування

На ефективність використання доступного спектру впливає той факт, що більша частина M2M/ІоТ пристроїв передаватимуть дані малого об'єму (до 50

кбіт/с), в такому випадку не використовуючи виділений ресурс в повній мірі. Вказана вище проблема, потребує негайного вирішення, адже кількість пристроїв мережі невпинно збільшується. Враховуючи те, що в зоні обслуговування базової станції прогнозується висока густина мобільних та M2M пристроїв, які створюватимуть значне навантаження на інфраструктуру, операторам мобільного зв'язку необхідно гнучко розподіляти радіоресурси для задоволення QoS E2E [30,31].

Використання нових технологічних рішень обслуговування зростаючого об'єму трафіку створює потребу удосконалення існуючої LTE – орієнтованої архітектури гетерогенної мережі 4G/5G. Розгортання менших, за охоплюваною площею, базових станцій не завжди вигідно з фінансової точки зору, а використання хендоверу між базовими станціями буде супроводжуватися значним завантаженням сигналізаційного каналу між базовими станціями різних рівнів. Та й такий спосіб не завжди вирішить проблему. Адже розумні пристрої та датчики і надалі передаватимуть дані напряму до базової станції, використовуючи для встановлення з'єднання значну частину сигналізаційних ресурсів, тим самим створюючи вузьке місце при обслуговуванні, а ресурсів, виділених під корисне навантаження, часто не буде вистачати всім.

Недостатність ресурсів під корисне навантаження пов'язана із чітко прописаними у стандарті LTE правилом, згідно якого одному пристрою можна виділяти мінімальний ресурс в часовій області 1мс, а в частотній – весь доступний ресурс каналу, зокрема при ширині смуги радіочастот 1,4 МГц виділяється 6 ресурсних блоків [32]. Вузьке місце, при обслуговуванні всіх охочих до передавання даних користувачів, впливатиме на часові параметри якості обслуговування. При значній кількості вхідних запитів, частина з них буде втраченою, оскільки дані, які потрібно було доставити до пункту призначення, вже будуть не актуальними. Якщо глянути на рис.1.8, бачимо, що значна кількість запитів поступає від будинку з датчика, кожен із яких

спілкується з базовою станцією, займає сигналізаційний канал і створює значне обчислювальне навантаження на контролер базової станції.

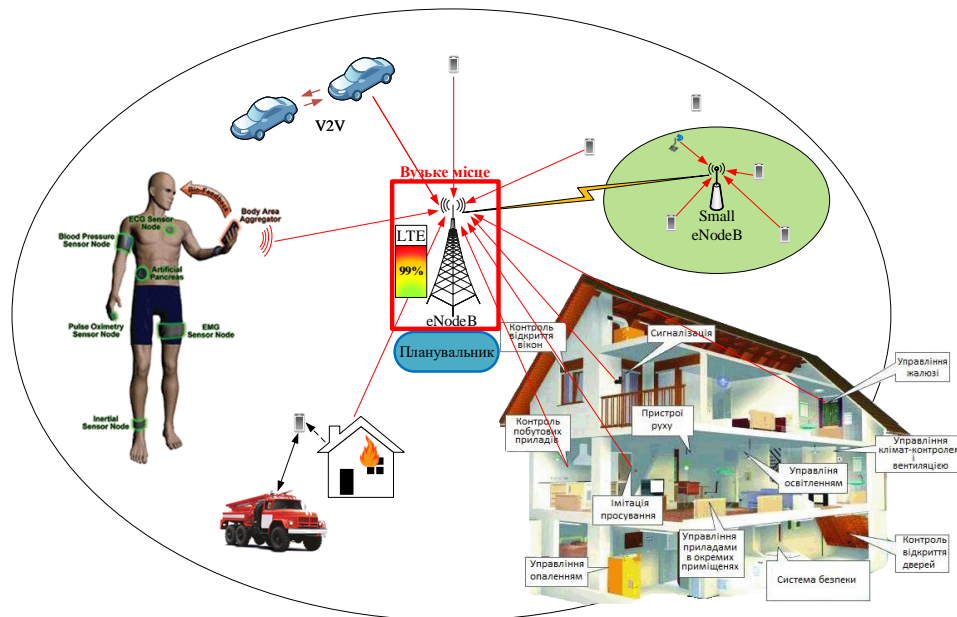


Рис. 1.8. Необхідність розвитку нових методів управління ресурсами в мережах побудованих на технології LTE

Сучасні методи управління потоками даних і раціонального розподілу ресурсів не є настільки гнучкими, щоб вирішити вищезгадану проблему. Враховуючи те, що кількість пристроїв зростає і генерований ними трафік потрібно обслужити з відповідними параметрами якості обслуговування, слід розробляти гнучкі методи управління інформаційними потоками та оптимального розподілу частотно-часових ресурсів LTE-орієнтованих мереж 4G/5G. Вони повинні враховувати особливості трафіку, тип сервісу, дані якого потрібно передати, і разом з цим вирішити проблему забезпечення необхідного частотно-часового ресурсу в умовах зростаючої кількості запитів на обслуговування з якомога меншою кількістю відмов.

1.3. Безпроводні вузькосмугові технології передавання даних та можливості їх використання у гетерогенній мережі 4G/5G

Технології для передавання даних постійно розвиваються, доповнюючи або витісняючи існуючі. Сучасні технології передавання даних надають

можливість обмінюватися інформацією в різному об'ємі та на різну відстань: від декількох метрів, аж до десятків кілометрів. В міру збільшення потреб передавання різної за обсягом та параметрами якості обслуговування інформації, гостро постає необхідність об'єднання цих технологій для задоволення потреб абонентів. Тому розглянемо деякі з передових вузькосмугових технологій передавання даних.

Основними вузькосмуговими технологіями, інтеграція яких можлива у мобільну мережу, що працює на стандарті LTE є: LoRaWan, Стриж, Sigfox, NB IoT, NB-LTE, Wireless RF, Bluetooth, Wi-Fi, Zigbee [33-35]. Всі ці технології мають свої переваги та недоліки. Всі вищезгадані технології можна поділити на дві частини: технології ближньої дії та технології, що дають змогу обмінюватися даними на відстані більше 100 метрів. Основні технічні характеристики цих технологій відзначено у таблицях 1.1 та 1.2. Кожна технологія має свої параметри, згідно яких її можна використовувати тільки для обмеженого кола завдань. Цими параметрами, насамперед, виступають швидкість та віддаль передавання даних. Інші, параметри є, по-суті, другорядними і, в першу чергу, впливають на здатність датчиків утворювати стійку структуру мережі, яка б відповідала вимогам щодо забезпечення якості обслуговування.

Часто вузькосмугові технології фізично поєднанні в одному пристрої. Таке поєднання надає додаткової гнучкості при передаванні даних, адже є альтернативні шляхи доставки інформації. При цьому, якщо один пристрій обмінявся інформацією з іншим, по одній технології, то третьому він може передати цю інформацію ще по іншій технології. Однак ключовим моментом при такому способі передавання інформації є сумісність технологій, тобто можливість сумарного забезпечення такої якості обслуговування, яка дозволить доставити до пункту призначення дані вчасно і вони будуть або мінімально спотвореними або рівноцінні оригіналу.

Така умова накладає деякі обмеження при поєднанні різних технологій, наприклад, на утворення структури локальної мережі безпроводних технологій, в якій кожен пристрій (ланка локальної мережі) може вносити свої корективи в якість обслуговування. Передавання даних безпроводними мережами зумовлено тією зручністю, що немає прив'язки до постійного місцеперебування, тобто пристрої можуть пересуватися територією і надсилати дані до пункту призначення без особливих перешкод.

Однак є частина статичних датчиків, для яких немає гострої необхідності перебудови мережі, яка присутня при русі пристроїв. Проте є одна спільна проблема, яка стосується як статичних так і динамічних пристроїв (датчиків). Вона пов'язана із використанням спектру, який може бути або ліцензійним або неліцензійним. Ліцензійний спектр надає більше можливостей по забезпеченню якості обслуговування, на відміну від неліцензійного. При передаванні даних у неліцензійному спектрі практично немає гарантій забезпечення вчасної доставки даних до пункту призначення.

Таблиця 1.1

Технічні характеристики технологій дальньої дії

Технічні характеристики	LoRaWan	Стриж	SigFox	NB IoT	NB LTE
Віддаль дії	2-5 км в міській зоні та 45 км в приміській зоні	До 40 км	10 км в міській зоні, до 50 км в приміській зоні	-	-
Частота	< 1 ГГц	868,8 МГц	Частотно незалежна технологія	7-900 МГц	7-900 МГц
Швидкість передавання даних	0,3 – 50 кбіт/с	50 біт/с	10 – 1000 біт/с	UL 1-32 кбіт/с; DL 1-20 кбіт/с	UL 1-144 кбіт/с; DL 1-200 кбіт/с
Споживання електроенергії	низьке	низьке	низьке	низьке	низьке
Підтримка мобільності датчиків	Так	Так	Ні	Так	Так
Відомості про місцезнаходження датчика	Так	Ні	Ні	Так	Так
Масштабованість	Так	Так	Так	Так	Так

Вибір вузькосмугової технології для передавання даних IoT/M2M датчикам є важливим моментом при інтеграції в мобільну мережу, що працює на основі технології LTE. При виборі вузькосмугової технології потрібно враховувати і той факт, що частина із них працює в неліцензійному спектрі, тому це вносить суттєві обмеження при їх використанні, що, насамперед, позначаються на якості обслуговування. Оптимальний вибір цих технологій дозволить збалансувати навантаження на ключові структурні елементи утвореної гетерогенної мережі.

Таблиця 1.2

Технічні характеристики технологій ближньої дії

Технічні характеристики	Wireless RF	Bluetooth	Wi-Fi	Zigbee
Віддаль дії	До 100 м за прямої видимості	10	До 120 м	100 м
Частота	315/433 МГц	2,4 ГГц	2,4 ГГц, 5 ГГц	915 МГц / 2,4 ГГц
Швидкість передавання даних	10 – 115,2 кбіт/с	< 1 Мбіт/с	7 Гбіт/с (802.11ac)	250 кбіт/с
Споживання електроенергії	Наднизьке	Понижене	Високе	Низьке
Підтримка мобільності датчиків	-	Так	Так	Так
Відомості про місцезнаходження датчика	-	Ні	Так	Так

Таким чином, обчислювальна завантаженість кожного структурного елемента гетерогенної мережі впливатиме на параметри якості обслуговування і вона ж визначатиме продуктивність мережі в цілому.

1.4. Аналіз існуючих методів розподілу частотно-часових ресурсів у сучасних мережах мобільного зв'язку стандарту LTE

Ефективність функціонування будь-якої мережі передавання даних можна охарактеризувати двома параметрами: обчислювальною потужністю активного обладнання та пропускнуою здатністю, яку може забезпечити це обладнання з

врахуванням кількості запитів на обслуговування. Раціональне виділення ресурсів між запитами користувачів є складною задачею, на вирішення якої часто впливає низка факторів, зокрема, це кількість запитів на обслуговування в годину найбільшого навантаження та обсяг доступних частотно-часових ресурсів. Загалом для обслуговування абонентів можна використовувати наступні способи підвищення пропускної здатності:

- запровадження похвилинної оплати, введення нових акційних пропозицій, тарифних планів. Цей спосіб в основному і застосовується в мобільних мережах;

- застосування диференційного обслуговування: запровадження категорій абонентів, кожна із яких має своє значення якості обслуговування за відповідну ціну;

- наскрізне резервування ресурсів у відповідності до SLA договорів для юридичних осіб;

- спосіб динамічного управління мережею, що полягає у своєчасній реакції контролера базової станції на зростання кількості запитів на обслуговування шляхом зменшення пропускної здатності для певної категорії абонентів (наприклад, згідно тарифних планів або пріоритетів трафіку або типу сервісу).

Всі вищенаведені способи підвищення пропускної здатності дають поверхневе уявлення про виділення ресурсів контролером базової станції. Вони не враховують умов навколишнього середовища та принципів роботи технології, згідно якої працює мережа.

Існує і ряд інших способів забезпечення необхідної пропускної здатності, зокрема, це метод забезпечення максимальної пропускної здатності, метод максимальної справедливості, метод пропорційного розподілу [36].

Суть роботи першого методу полягає у виділенні ресурсів в першу чергу тим користувацьким пристроям, в яких значення відношення сигнал/шум є найвищим в порівнянні з іншими пристроями. Однак, цьому методу

характерний один суттєвий недолік, а саме: всі ресурси будуть використовувати переважно ті користувачі, пристрої яких знаходяться найближче до базової станції. Для решти пристроїв можливість передавання даних не передбачено.

Другий метод забезпечення пропускної здатності робить вирівнювання швидкості передавання даних для пристроїв із низьким відношенням сигнал/шум та пристроїв із високим значенням відношення цих параметрів. Цей метод має також суттєвий недолік, а саме: користувацький пристрій, що знаходиться в таких місцях на території обслуговування базової станції, де він має відношення сигнал/шум низьке буде суттєво впливати на кількість відмов у обслуговуванні для інших пристроїв, оскільки для передавання своїх даних використовуватиме значну частину ресурсів базової станції.

Щодо третього методу забезпечення пропускної здатності, то він, здавало б ідеальний випадок для обслуговування пристроїв в умовах зростання їх кількості. Однак цей метод потрібно удосконалювати у зв'язку з тим, що він не робить глибокого аналізу вимог, що стосується обслуговування абонентів. Суть його роботи в основному ґрунтується на порівнянні значень відношення сигнал/шум до середнього значення відношення сигнал/шум для різних користувачів. Згідно цього методу виділення ресурсів відбувається користувачам, в яких отримана величина є найбільшою незалежно від суттєвих параметрів, впливають на якість обслуговування, насамперед, це затримка доставки даних, пріоритет та тип сервісу (реальний/нереальний). Однією з ключових особливостей мережі четвертого покоління є здатність одночасної підтримки додатків з різними вимогами до якості обслуговування (QoS). Для цього в стандарті LTE передбачено дві основні системи обробки пакетів:

- з'єднання із гарантованою мінімальною швидкістю передавання даних (GBR);
- з'єднання із негарантованою швидкістю передавання даних (Non-GBR).

При гарантованій мінімальній швидкості передавання дані передаються на мінімальній швидкості передавання, але при наявності вільних частотно-

часових ресурсів можливе передавання даних і на більших швидкостях. При встановленні з'єднання типу Non-GBR мережа не гарантує навіть мінімальної швидкості передавання даних, тому у випадку перевантаження для цих з'єднань може відбуватися втрата пакетів [37,38].

На участку мережі між базовою станцією і користувацьким пристроєм забезпеченням параметрів якості обслуговування займається базова станція. Кожному інформаційному потоку прописаний параметр класу обслуговування QoS – QCI. Кожному класу обслуговування QoS відповідає декілька ідентифікаторів QCI [39-41]. Кожен ідентифікатор QCI (таблиця 1.3) визначає значення наступних параметрів якості обслуговування: пріоритет, допустима затримка і допустима кількість втрачених пакетів.

Значення допустимої ймовірності помилок і втрат пакетів оцінюється тільки для сервісів, передавання пакетів яких відбувається із використанням протоколу транспортного рівня TCP [42]. Тому при значенні допустимих втрат менше 10^{-6} , використовується передавання даних із підтвердженням. Найбільший пріоритет (1 клас) має найвище значення цього параметру. До таких сервісів переважно відносять трафік керування мережею. Сервіси із пріоритетом 9 використовується переважно при доставці IP – трафіку непривілейованим абонентам [23-24].

Для забезпечення потрібної якості обслуговування необхідно поділити всі сервіси на класи із фіксованими значеннями параметрів QoS і виділення частотно-часових ресурсів проводити, посилаючись на них. При цьому мережа не повинна зазнавати перевантаження, а втрати пакетів даних, ресурси для передавання яких виділяє базова станція, не повинні перевищувати значення зафіксовані при класифікації.

Таблиця 1.3

Параметри якості обслуговування для послуг, які можуть бути надані мережею LTE

QCI	Тип ресурсу	Пріоритет	Допустима затримка, мс	Допустима ймовірність помилок і втрат пакетів	Приклади послуг
1	GBR	2	100	10^{-2}	Телефонія в режимі реального часу
2		4	150	10^{-3}	Відеотелефонія, відео в режимі реального часу
3		3	50	10^{-3}	Ігри в реальному часі
4		5	300	10^{-6}	Відео з буферизацією
5	Non-GBR	1	100	10^{-6}	Сигналізація (IMS)
6		6	300	10^{-6}	Відео з буферизацією, TCP/IP послуги для пріоритетних користувачів
7		7	100	10^{-3}	Аудіо, відео в режимі реального часу, інтерактивні ігри
8		8	300	10^{-6}	Передача відео з буферизацією з використання TCP
9		9			

Згідно технології LTE вчасне доставлення даних можна забезпечити шляхом гнучкого розподілу частотно-часових ресурсів, які містяться в межах кадру тривалістю 10 мс. Кадр як низхідного так і висхідного каналу містить 10 субкадрів, тривалість кожного із яких 1 мс. Кожен із субкадрів в часовій області складається з двох ресурсних блоків. Кількість ресурсних блоків у частотній області різна при різній ширині каналу. Загальна кількість ресурсних блоків в частотній області наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Кількість ресурсних блоків у частотній області

Ширина каналу, МГц	0,2	1,4	3	5	10	15	20	100
Кількість ресурсних блоків	1	6	15	25	50	75	100	500
Кількість піднесучих	12	72	180	300	600	900	1200	6000

При низхідному та висхідному каналі зв'язку корисна пропускна здатність відрізняється, незважаючи на те, що кількість ресурсних елементів однакова. Така ситуація складається через те, що для обох напрямків передавання передається різна кількість сигнальної інформації. Передавання даних від базової станції вимагає надсилання синхронізації (первинної та вторинної), широкомовної інформації, індикатора формату, опорного сигнал антен та інформації про необхідність повторної передачі даних. Натомість для висхідного каналу її не потрібно передавати.

Кожен ресурсний блок містить 6 або 7 символів (для низхідного каналу це OFDM символи, а для висхідного – SC-FDMA символи) в залежності від тривалості циклічного префіксу у часовій області, та 12 піднесучих в частотній. На перетині символу та піднесучої у ресурсній сітці розташовується ресурсний елемент. Кожен ресурсний елемент в певній позиції для низхідного та висхідного каналу при різній ширині каналу передає або корисне навантаження або службове. Загальна структура кадру показана на рис. 1.9.

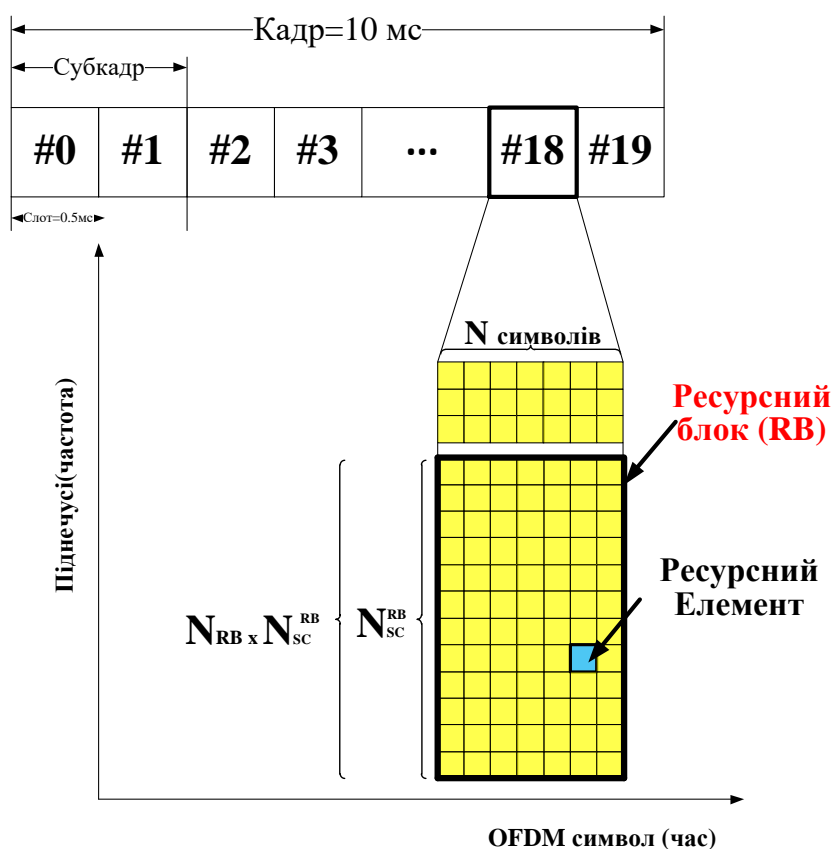


Рис.1.9. Загальна структура кадру

Загальний вигляд частини кадру для низхідного та висхідного каналів зв'язку показано на рис.1. 10 та 1.11 відповідно.

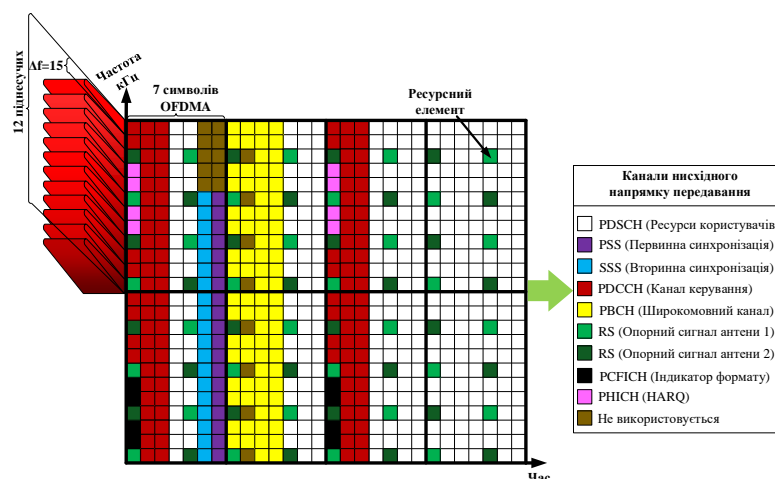


Рис.1.10. Ресурсна сітка та розташування корисних і сигналізаційних даних в кадрі низхідного каналу зв'язку

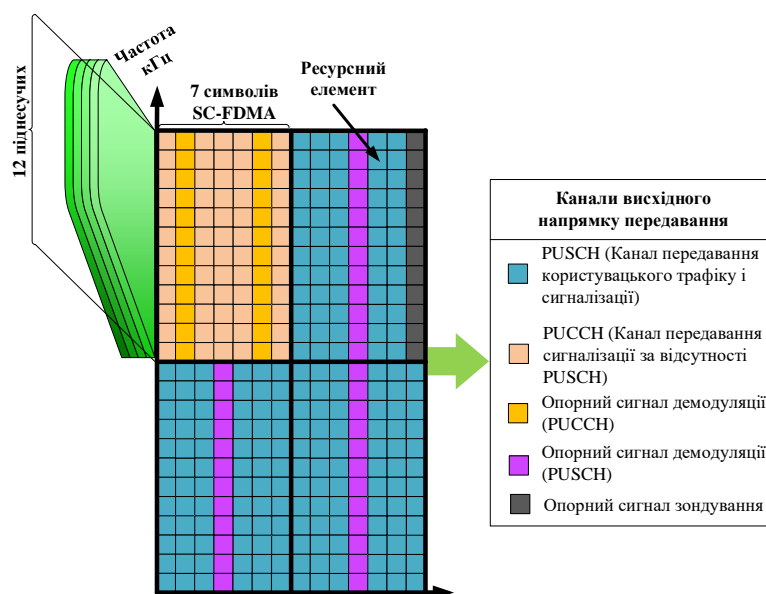


Рис.1.11. Ресурсна сітка та розташування корисних і сигналізаційних даних в кадрі висхідного каналу зв'язку

У низхідному каналі зв'язку для передавання будь-якого роду інформації, чи це сигналізаційна чи це корисна, використовується технологія мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDMA). Для висхідного каналу використовується інша технологія – SC-FDMA [43-46],

хоча схема формування сигналу містить ту ж послідовність кроків за винятком того, що для висхідного каналу зв'язку сигнал не перетворюють в паралельну форму задля економії енергетичних ресурсів батареї при передаванні даних.

Із рис. 1.10 та 1.11 бачимо, основну різницю між передаванням символу у низхідному та висхідному каналах зв'язку. Для напрямку передавання від базової станції до пристрою користувача передавання даних відбувається на всіх піднесучих одночасно. Натомість зворотної передачі використовується тільки одна піднесуча.

Основними перевагами, що надає використання технології мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів, є здатність передавати дані в складних умовах радіоканалу. Технологія OFDMA має змогу уникати міжсимвольну інтерференцію та боротися з вузькосмуговими завадами. Технологія SC-FDMA надає можливість уникати високого значення потужності сигналу для кожного з каналів передавання. Це дозволяє економити заряд батареї.

Ці дві технології (OFDMA і SC-FDMA) дають змогу передавати дані в умовах щільної забудови, для якої характерне багатопроменеве поширення сигналу. Уникнення явища «ехо» при багатопроменевому поширенні сигналу досягається за рахунок використання циклічного префіксу: нормального або розширеного. Характеристики обох циклічних префіксів наведено у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Характеристики циклічного префікса висхідного каналу зв'язку

Циклічний префікс	Нормальний		Розширений
	$160 \times T_S$	$144 \times T_S$	$512 \times T_S$
Тривалість	5,2 мкс	4,7 мкс	16,7 мкс
Різниця шляхів поширення	1,6 км	1,4 км	5 км
Відношення тривалості префікса до тривалості символу	$160 / 2048 = 7,8\%$	$144 / 2048 = 7\%$	$512 / 2048 = 2,5\%$

Циклічний префікс представляє собою копію частини закінчення символу, яку вставлено на початок символу. Таке вставляння зменшує корисне навантаження, яке передає символ і впливає на корисну пропускну здатність. У

таблиці 1.5 параметр $T_S = \frac{1}{15000 \times 2048} \approx 3 \times 10^{-8}$ (високочастотна синхронізація).

З цієї таблиці бачимо, що використання того чи іншого циклічного префіксу залежить від різниці шляхів поширення радіосигналу. Чим більша ця різниця, тим тривалість циклічного префіксу зростає і відповідно він займає більшу частину символу. Частку зайнятості символу циклічним префіксом представлено відношення тривалості префікса до тривалості символу. Максимальне значення відношення цих величин становить 2,5 % для розширеного циклічного префікса.

Для забезпечення відповідної якості обслуговування UE повинен надсилати до базової станції повідомлення про стан каналу зв'язку, в якому вказано показник CQI (Channel Quality Indicator) [47-49]. Цей показник UE визначає із залежності, що показана на рис.1.12.

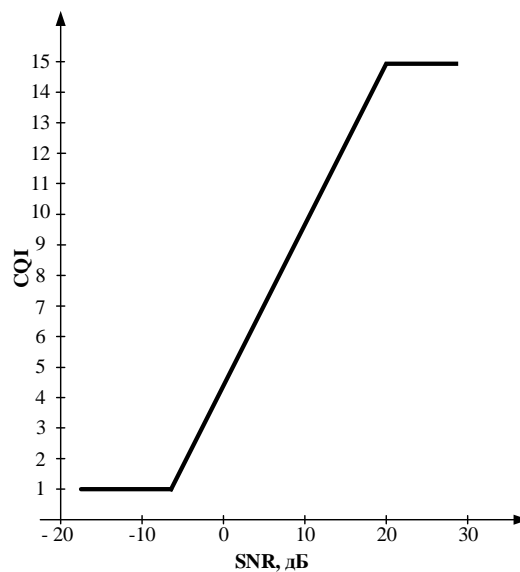


Рис.1.12. Діаграма визначення значення індикатора якості каналу

При передаванні даних в обох напрямках, згадані технології мультиплексування, надають можливість адаптивно використовувати модуляцію і швидкість коду. Ці два параметри (модуляція та швидкість коду) у технології LTE представлено модуляційно-кодovими схемами, що жорстко закріплені з значенням індикатора якості каналу (таблиця 1.6). Значення останнього

визначає базова станція на основі відношення сигнал/шум (рис.1.12), отриманого від користувачького пристрою [50].

В таблиці 1.6 можна побачити всі комбінації стандартизованих модуляційно-кодкових схем із відповідними значеннями відношення сигнал/шум, при яких вони використовуються. Також у цій таблиці наведено значення спектральної ефективності для кожного значення індикатора якості каналу.

Таблиця 1.6

Відповідність значень індикатора якості каналу, модуляційно-кодкових схем та відношення сигнал/шум

Індекс показника якості каналу	Модуляція	Швидкість кодування	Спектральна ефективність	Відношення сигнал/шум
1	QPSK	78/1024	0.1523	-6.7
2	QPSK	120/1024	0.2344	-4.7
3	QPSK	193/1024	0.3770	-2.3
4	QPSK	308/1024	0.6016	0.2
5	QPSK	449/1024	0.8770	2.4
6	QPSK	602/1024	1.1758	4.3
7	16QAM	378/1024	1.4766	5.9
8	16QAM	490/1024	1.9141	8.1
9	16QAM	616/1024	2.4063	10.3
10	64QAM	466/1024	2.7305	11.7
11	64QAM	567/1024	3.3223	14.1
12	64QAM	666/1024	3.9023	16.3
13	64QAM	772/1024	4.5234	18.7
14	64QAM	873/1024	5.1152	21.0
15	64QAM	948/1024	5.5547	22.7

На основі модуляційно-кової схеми планувальник на контролері базової станції розраховує пропускну здатність [20] за формулою:

$$Rate = N_{RB} \times N_{subcarrier} \times N_{sym} \times MIMO \times mod \times kodRate \times 1000, \quad (1.1)$$

де: N_{RB} - кількість ресурсних блоків у частотній області (див. табл. 2.1);

$N_{subcarrier}$ - кількість піднесучих (таблиця 1.4); N_{sym} - кількість OFDM

символів в межах ресурсного блоку; $MIMO$ - кількість антен на передачу

(прийом); mod - кількість біт, що передається одним символом, $mod = \log_2(M)$

(M - позиційність модуляції (наприклад, якщо модуляція 64 QAM, тоді $M = 64$), див. таблицю 1.6); $kodRate$ - швидкість коду (див. таблицю 1.6) [51-53].

Незважаючи на важливу роль планувальника, алгоритми планування розподілом ресурсів не стандартизовані для існуючих систем зв'язку, тому кожен виробник базових станцій використовує власні реалізації алгоритмів планування. Створення подібних алгоритмів є відкритим завданням, так як вимоги до них дуже великі і не існує строгих теоретичних досліджень про їх максимальну продуктивність.

У роботі проведено огляд наукових досліджень в напрямку розвитку алгоритмів та методів планування розподілом ресурсів в мережах 4G/5G стандарту LTE в умовах розгортання сервісів M2M.

Отже, в роботі [53] представлений детальний огляд планувальників висхідної лінії зв'язку LTE для пристроїв M2M. У цьому дослідженні автори зазначають, що існуючі планувальники можна поділити на два основні типи: планувальники енергозбереження, які спрямовані на зменшення споживання енергії в пристроях M2M [54]; Планувальники на основі QoS, які мають на меті забезпечити необхідний рівень QoS для кожного типу додатків M2M [55-57].

Для зменшення кількості базових станцій та покращення продуктивності системи за рахунок розширення зони покриття пропонується використовувати гібридний планувальник висхідної лінії зв'язку QoS [58]. Запропоноване рішення в цій роботі являє собою гібридну модель між двома планувальниками, кожен з яких є найкращим рішенням для планування обслуговування в режимі реального часу, а інший - для планування обслуговування в нереальному часі, щоб задовольнити критерії QoS, що максимізують пропускну здатність та мінімізують втрату пакетів.

Н. В. Rekhissa та ін. [59] представили два алгоритми планування розподілу ресурсів у висхідній лінії зв'язку для пристроїв M2M через LTE. Алгоритми засновані на якості каналу при розподілі ресурсних блоків для пристроїв. Перевагою алгоритмів є те, що їх використання зменшує кількість ресурсних

блоків ресурсів (RB), необхідних для передавання даних, а отже, зменшує енергію, споживану пристроями. Однак розроблений авторами алгоритм не може гарантувати вимоги до щодо забезпечення необхідної затримки передавання даних від M2M пристроїв. Також було показано, що запропонований алгоритм планування ресурсів Recursive Maximum Expansion Modified (RME-M), який враховує обмеження затримки, не дає змогу всім класам відповідати вимогам QoS з великою кількістю M2M пристроїв з точки зору затримки.

У роботі [60] автори пропонують гібридний алгоритм планування для гетерогенної мережі 5G мережі, що працює як з H2H (Human-To-Human), так і з M2M. Мережевий трафік класифікується на дві черги, кожна з яких планується окремо. Перша черга включає всіх користувачів H2H (UE) та пристроїв зв'язку машинного типу Machine Type Communications Devices (MTCD), чутливих до затримок. Планування базується на поєднанні показників, включаючи час очікування буфера, пропорційну справедливість та пороги затримки. Друга черга включає всі залишені (стійкі до затримки) MTCD, які плануються за допомогою комбінації планувальників, що базуються на стані каналу та алгоритму розподілу ресурсів Round Robin.

З аналізу проведеної роботи випливає, що однією з основних проблем при розгортанні мереж 4G/5G для зв'язку M2M є проблема оптимального управління радіоресурсами та планування розподілом. Існуючі алгоритми планування H2H LTE, орієнтовані головним чином на максимізацію смуги пропускання та підтримання безперервності виділення радіоресурсів, призначених певному пристрою, та є не ефективними для використання з MTC. Це пов'язано з тим, що зв'язок M2M має інші характеристики порівняно з підключенням H2H. Трафік MTC складається здебільшого з невеликих за обсягом навантаження, які існують переважно в напрямку висхідної лінії зв'язку (тобто від пристрою до обслуговуючої базової станції). MTCD також використовуються в широкому спектрі застосувань. Кожна програма має свої

вимоги, які можуть включати певний рівень якості обслуговування (QoS), мінімізацію споживання енергії або допустимий час передавання даних. Час передавання в цьому контексті - це час, до якого дані повинні передаватися, щоб уникнути небажаних наслідків, наприклад, у разі аварійного попередження.

Таким чином, з урахуванням активного зростання трафіку M2M взаємодії, завдання оптимального розподілу радіоресурсів стає все більш актуальною для операторів мереж зв'язку стандарту LTE. До основних завдань у безпроводних мережах наступного покоління 4G/5G відноситься оптимізація розподілу обмеженого числа радіоресурсів між користувачами UE та пристроями M2M за критерієм наскрізної якості обслуговування E2E QoS.

1.5. Огляд існуючих методів управління інформаційним потоками та необхідність їх розвитку для забезпечення якості обслуговування в мережах 4G/5G

В процесі управління трафіком в телекомунікаційних мережах фіксованого та мобільного зв'язку гостро постає питання обслуговування користувачів за недостатньої продуктивності мережевих пристроїв або ж у випадку обмеженої кількості ресурсів. В цьому випадку використовують різні обслуговування (черги) в мережевих вузлах, зокрема: (FIFO (First In First Out); WFQ (Weighted Fair Queuing); пріоритетні черги (Priority Queuing)).

FIFO – First In First Out – тип черги, що відповідає принципу перший прийшов у чергу першим обслуговується, тобто при надходженні пакетів формується черга, вихід з якої відбувається в тому порядку, в якому вони поступили. У такій черзі дані, що поступили від різних додатків, без врахування затримок обслуговуються з однаковим пріоритетом. На рис. 1.13 показано принцип обслуговування для FIFO [61-63].



Рис. 1.13. Принцип організації черги FIFO

Незважаючи на свою простоту, FIFO призводить до значного очікування на обслуговування, оскільки пакети, що поступають, розміщуються в кінці черги враховуючи миттєве обслуговування. Чим більша кількість пакетів знаходиться в черзі, тим більший час на передавання. Враховуючи це, дані, що значний час знаходилися в черзі можуть втратити свою актуальність. Попри такий недолік, FIFO володіє і деякими перевагами. До них відносять можливість спільного використання із протоколом ТСР. На приймальну сторону пакети приходять в потрібному порядку, тому не потрібно проводити сортування для відтворення даних.

Згідно з *Priority Queuing* (рис.1.14) формуються декілька черг на мережевому інтерфейсі, кожній з яких присвоюється певний рівень пріоритету. Черга із вищим пріоритетом опрацьовується першою. До пріоритетної черги може входити чотири, наперед налаштовані, потоки даних: дуже високого, середнього, нормального і низького пріоритету.

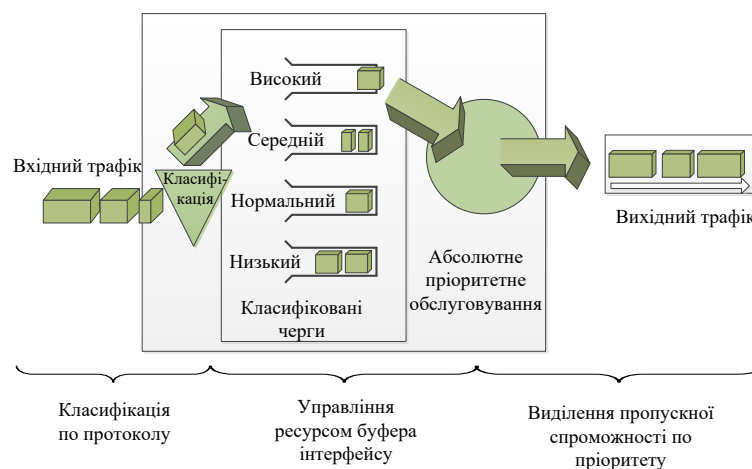


Рис. 1.14. Формування декількох черг відповідно до priority queuing

Якщо пакети формують високо пріоритетну чергу, то всі дії для низько пріоритетної черги призупиняється. В такий спосіб перше відбувається обслуговування високопріоритетного потоку. При передаванні пакетів на інтерфейсі пристрою, відбувається сканування пакетів в порядку зменшення пріоритету. Спочатку сканують чергу з високим пріоритетом, потім середнього і так далі. Для передавання вибирається пакет із верхньої частини черги. Така

процедура повторяється кожен раз, коли пакет повинен бути відправленим. Якщо черга збільшується, то пакети на її кінцях відкидаються.

Тому пріоритетне обслуговування зазвичай застосовується в тому випадку, коли в мережі є чутливий до затримок трафік, але його інтенсивність невелика, так що його наявність не занадто ущемляє інший трафік. Наприклад, голосовий трафік чутливий до затримок, але його середня інтенсивність зазвичай не перевищує кількох сотень Кбіт/с, і, таким чином, при призначенні йому найвищого пріоритету інші класи трафіку не постраждають. Однак в мережі можуть спостерігатися й інші ситуації. Зокрема, відеотрафік теж вимагає першочергового обслуговування, але має набагато більш високу інтенсивність. Для таких випадків розроблені алгоритми управління чергами, що дають низькопріоритетному трафіку деякі гарантії навіть у періоди підвищення інтенсивності високопріоритетного трафіку.

Зважена справедлива організація черг (Weighted Fair Queuing, WFQ) – метод планування пакетних даних, що дозволяє задавати різні пріоритети на основі статистично ущільнених потоків даних. WFQ (рис. 1.15) – узагальнена схема справедливої черги [64]. За WFQ, загальний потік поділяється на окремі черги, кожна з яких обслуговується за принципом FIFO. У WFQ, за швидкості передавання даних R і активних потоках даних N , обслуговування відбувається одночасно, зі швидкістю R/N кожен. Враховуючи те, що окремий потік має власну чергу зі сталою швидкістю обслуговування, це впливатиме на якість обслуговування. Кількість таких потоків, пакетів у них, а також їх розмір позначатимуться на продуктивності мережі. Принцип WFQ полягає у тому, що при різних сеансах – різні сервіси потребують обслуговування. Якщо N потоків даних активні, з вагами w_1, w_2, \dots, w_N , то загальний потік даних з числом i буде активним із швидкістю:

$$\frac{Rw_i}{w_1 + w_2 + \dots + w_N}. \quad (1.2)$$

Регулюючи ваги потоків даних, можна добитися заданої швидкості передавання і відповідної якості обслуговування.

WFQ автоматично згладжує загальний потік, сортуючи пакети. В такий спосіб зменшується час очікування на передавання та ефективно надаються ресурси як вузько смуговим так і широкосмуговим даним. В методі передавання WFQ, пріоритет віддається трафіку обернено пропорційно до пропускної здатності каналу. Виходячи із цього, першими обслуговуються вузькосмугові сигнали, а широкосмугові поступають у буфер.

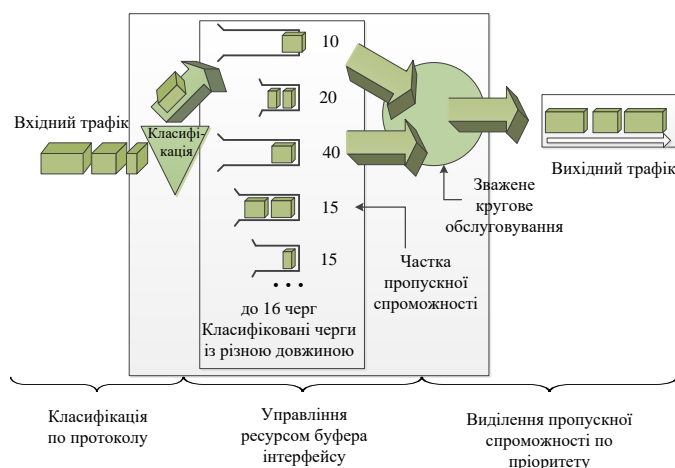


Рис. 1.15. Принцип Weighted Fair Queuing

В потоковому WFQ, пакети класифікуються на основі IP-адреси джерела і одержувача, а також вихідного протоколу TCP або порта UDP, або TCP одержувача чи UDP порта. Кожен потік отримує однакову пропускну здатність. Відповідно до цього, метод називається справедливим. WFQ блокує високошвидкісний трафік, зменшуючи кількість виділених ресурсів на користь низько швидкісних даних, призводячи до збільшення QoS для непріоритених потоків даних, що яскраво спостерігається у період високого навантаження.

Мережі 4G/5G повинні забезпечувати необхідний рівень QoS для різних сервісів. Гарантування якості обслуговування досягають шляхом виділення високої смуги пропускання. Однак такий метод – дорогий. Суть інших методів полягає у пріоритетному наданні ресурсів мережі «чутливим протоколам» за рахунок протоколів, яким не потрібен високий рівень QoS.

В мережах 4G/5G слід сформувати «розумну чергу», у якій пріоритет залежить, як від типу сервісу. Різні типи сервісів вимагають різної пріоритезації.

Враховуючи те, що M2M комунікація бурхливо розвивається [65-68], одна з основних задач сучасних мереж полягає у адаптивному наданні послуг згідно з вимогами конкретного виду сервісу. Тому методи управління інформаційними потоками M2M в мережах 4G/5G – одні з найважливіших напрямків, від яких в подальшому залежатиме якісне надання послуг.

Моніторинг – один із способів підвищення QoS. З його допомогою можна визначити пріоритетні напрямки розвитку цілої мережі, в такий спосіб передбачивши вузькі місця при обслуговуванні користувачів. Моніторинг дозволить не тільки знайти фактори які знижують можливість надання необхідного рівня QoS, але і стане поштовхом до пошуку алгоритмів і методів їх вирішення.

При реалізації послуг з використанням мобільної мережі необхідно враховувати не тільки пріоритет користувача. Увагу слід акцентувати і на затримці, швидкості передачі запиту на виконання, а також гарантії виконання. Що стосується останнього, то при реалізації обміну даних між пристроями, важливо погодити параметри якості обслуговування між ядром мереж LTE та зовнішніми IP-мережами. З метою ефективного надання послуг, погодження параметрів повинно здійснюватися на двох кінцях передачі з метою оптимального і своєчасного виконання запитів до відповідного пристрою. При обслуговуванні користувачів передбачено використання буферів пам'яті у вузлах мережі, які служать в якості критичної черги. При надсиланні пакети звільнятимуть зайняті місця, натомість поступатимуть нові. З метою ліквідації відмов передбачено використання інших (додаткових) буферів, які служитимуть певним розширенням до черги та зменшать її розмір.

При використанні виділених ресурсів, важливим є фактор встановлення швидкості передавання. Зокрема, вона може поділитися на гарантовану та

негарантовану. Виділення швидкості – важливий момент, оскільки при передачі одних пакетів потрібне гарантоване її значення, а для реалізації інших – ні. Виділення необхідного значення пропускної здатності відбувається за допомогою методів, що розглянуті в попередньому підрозділі.

При виділенні швидкості доставки запиту до пристрою на виконання певних дій, важливою є відстань. Адже при цьому запит може проходити декілька проміжних пунктів, що створить додаткову затримку. З метою її зменшення передбачено проміжні буфери пам'яті, оскільки втрата пакетів можлива в будь-якому місці на шляху проходження від базової станції до користувацького пристрою чи в зворотному порядку.

Мобільність користувача – важливий фактор, що значно впливає на надання послуг [69-71]. В такому випадку обслуговування переходитиме від одної станції до іншої. Як відомо, при цьому змінюватиметься і швидкість передавання пакетів.

Загалом підвищення рівня QoS потребує ведення нагляду за станом мережі. Це надає можливість зафіксувати вузькі місця та в подальшому досліджувати нові методи для їх усунення.

1.6. Постановка науково-практичного завдання дисертаційного дослідження

На основі проведеного аналізу встановлено, що стрімкий розвиток і впровадження мереж четвертого та п'ятого покоління ставить нові вимоги до збільшення пропускних здатностей каналів та підвищення якості послуг абонентам мобільних мереж. Збільшення обсягу трафіку, що передається в мережах мобільного зв'язку та створення нових додатків, що вимагають високих швидкостей передавання даних потребує розвитку нового покоління мереж мобільного зв'язку з набагато більшою продуктивністю у порівнянні із існуючими системами мобільного зв'язку. Такий стрімкий розвиток мереж

4G/5G призводить до постійної нестачі ліцензійних частот для операторів, що ставить перед ними важливе завдання ефективного його використання.

Зокрема, в умовах швидкого зростання трафіку мобільного передавання даних, популярності Інтернету речей (Internet of Things, IoT) та M2M (міжмашинної взаємодії, Machine-to-Machine), оператори постійно працюють над покращенням якості зв'язку, розвиваючи мережі 4G в напрямку майбутніх 5G на основі технології LTE. Технологія LTE в силу особливостей побудови радіоінтерфейсу є найбільш придатною для застосування методів динамічного управління пропускнуою здатністю. Дослідження існуючих методів підвищення пропускнуої здатності в LTE - орієнтованих мереж показало, що при розподілі частотно-часових ресурсів можуть бути застосовані адаптивні механізми виділення ресурсів, зокрема з використанням динамічного управління, проте існуючі механізми більшості є застарілими, стандартизованими та не відповідають сьгоднішнім викликам щодо якості надання послуг в умовах значного зростання трафіку. Відповідно, з наукової точки зору, відомі методи повинні базуватися на принципах узгодженості управління трафіком в ядрі мережі та розподілом ресурсів на рівні радіодоступу, що у свою чергу вимагає необхідності удосконалення алгоритмів управління трафіком та методів передавання даних для дотримання вимог користувачів щодо якості обслуговування в умовах обмежених мережних ресурсів.

Таким чином, відсутність можливості в технології LTE здійснювати наскрізне (узгоджене на рівні базової станції, ядра мережі та зовнішніх IP-орієнтованих мереж) диференційоване адаптивне управління окремими потоками від мобільних та M2M/IoT пристроїв, із врахуванням їх вимог до параметрів QoS (Quality of service), призводить до нераціонального розподілу навантаження та погіршення якості обслуговування, зокрема важливих сервісів реального часу.

Отже, враховуючи велику проникність мобільних мереж у сфери людської діяльності та постійне зростання обсягів M2M/IoT трафіку та кількості користувачів сервісів потокового контенту, актуальним науково-практичним

завданням є підвищення ефективності використання ресурсів та якості обслуговування в системах мобільного зв'язку нового покоління шляхом розроблення моделей гнучкого управління інформаційними потоками та методів оптимального розподілу мережевих ресурсів.

1.7. Висновок до розділу 1

У першому розділі наголошено на основних проблемах, що можуть появитися в сучасних мережах мобільного зв'язку при значному зростанні 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, ресурсні сітки каналу вверх та вниз, частотні діапазони, тощо. Розглянуто відомі типи черг, що використовуються для обслуговування мобільних абонентів. Проаналізовано можливі варіанти їх застосування в мережах з інтенсивним збільшенням трафіку від M2M пристроїв.

Розглянуто основні моменти при передаванні інформаційних потоків даних від користувача до базової станції (висхідний канал) та у зворотному напрямку (низхідний канал). Проведено аналіз надання ресурсів в умовах інтерференційного впливу з боку інших користувачів. цьому випадку увагу акцентовано на значення індикатора якості каналу, який сигналізує базовій станції про необхідність вибору адаптивної модуляції та швидкості коду. Проведено огляд наукових досліджень в напрямку розвитку алгоритмів та методів планування розподілом ресурсів в мережах 4G/5G стандарту LTE в умовах розгортання сервісів M2M.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ ТА УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМИ ПОТОКАМИ В МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ 4G/5G

2.1. Удосконалена архітектура LTE мережі для систем мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління в умовах зростання трафіку Інтернету речей

Зростання обсягів інформації, яку потрібно доставити від одного пристрою до іншого з необхідною якістю обслуговування спонукає до модернізації існуючих методів управління інформаційними потоками та ефективного розподілу частотно-часових ресурсів або пошуку і реалізації нових. Однак не завжди нові методи можна застосовувати до існуючої LTE архітектури. Архітектура сучасної мережі мобільного зв'язку для стандарту LTE, що працює повністю з комутацією пакетів на основі IP протоколу показана на рис. 2.1.

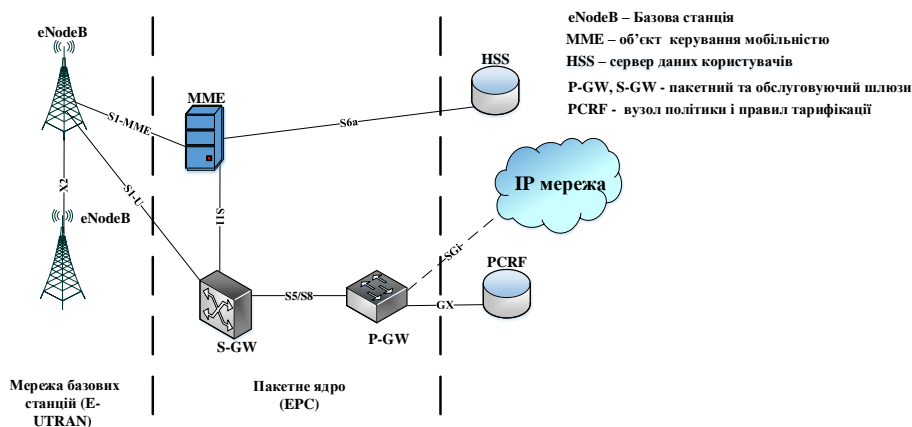


Рис. 2.1. Архітектура мережі LTE [72]

Основними компонентами ядра пакетної LTE мережі є такі елементи:

Сервер абонентських даних (HSS) являє собою велику базу даних і призначений для зберігання інформації про абонентів. Фактично HSS замінює собою бази VLR, HLR, AUC і EIR, які використовувалися в мережах 2G/3G. Обслуговуючий шлюз (S-GW) забезпечує передавання і обробку даних

користувача між призначеними для користувача пристроями (UE) і підсистемою базових станцій мережі LTE (eNodeB) оператора. Паке́тний шлю́з (P-GW) управляє потоками даних, що передаються в зовнішні пакетні мережі, по суті будучи в мережі оператора точкою входу і виходу для користувача трафіку. При поєднанні з PCEF (policy and charging enforcement function) - елементом мережі, що відповідає за застосування правил тарифікації, - забезпечує коректну роботу розрахункових систем і застосування тарифних правил. Вузол управління мобільністю (MME) забезпечує можливість перемикання між базовими станціями і роботу в роумінгу. Крім того, MME відповідає за аутентифікацію користувача пристроїв (UE), взаємодіючи з HSS, а також за вибір шлюзу S-GW. Кожен вузол EPC може забезпечувати не тільки функції перевірки і фільтрації мережевих пакетів по їх вмісту (Deep Packet Inspection (DPI)), але і різні функції законного перехоплення, використовуваного правоохоронними органами.

DPI - значна інновація в області мережевих технологій, яка формує основу багатьох сучасних послуг і послуг наступного покоління в мережах 5G. Для мереж постачальників послуг DPI-додатки включають в себе персоналізацію послуг абонентам, контент-орієнтований білінг, впровадження ранжируваних за якістю та оплатою послуг, управління трафіком, забезпечення підвищеного рівня безпеки та інші можливості.

Поточні тенденції в сфері послуг інтернет-контенту вказують, що вимоги для управління трафіком непередбачувані. Тому постачальники послуг, зокрема оператори мобільного зв'язку 4G/5G повинні реалізовувати нові DPI-рішення, де програмне забезпечення може бути оновлено для підтримки нових вимог до управління і контролю трафіку в міру необхідності. Ефективно управляючи мережевим трафіком на основі додатків, постачальники послуг можуть оптимізувати використання ресурсів мережі, що впливає на скорочення як капітальних, так і експлуатаційних витрат. Зокрема у роботах запропоновано власну програмну DPI систему, яка дає змогу виявляти мережеві аномалії та різноманітні атаки на основі аналізу критерію Херста трафіку [72-76]

передавати агрегований трафік як через базову станцію макрорівня так і через базову станцію фемторівня, тобто здійснювати балансування навантаження.

Запропонована архітектура гетерогенної мережі мобільного зв'язку четвертого/п'ятого покоління значно знизить службове навантаження на базову станцію та дасть змогу обслужити зростаючу кількість пристроїв та датчиків шляхом удосконалення процесу кластеризації пристроїв, агрегації та пріоритезації трафіку із можливістю його балансування між різними базовими станціями.

2.1.1. Особливості функціонування мультистандартного M2M шлюза в процесі пріоритетного управління трафіком

Основною проблемою, на яку робиться акцент у цій роботі, є стрімке зростання попиту на передавання даних безпроводними мережами. Враховуючи цю проблему, можна зробити припущення про значне навантаження на ключові структурні елементи мобільної мережі, що функціонує на основі технології LTE. Цими структурними елементами, насамперед, є контролер базової станції та інтерфейси обміну службовою інформацією. Зменшення навантаження на ці елементи архітектури мережі LTE можна досягти за рахунок інтеграції та спільного використання різних технологій. Сукупність цих технологій нададуть можливість правильного розподілу частотних ресурсів між всіма охочими до передавання даних пристроями, а також сприятимуть зростанню кількості обслужених пристроїв, яким забезпечено, як мінімум, мінімально допустиме значення якості обслуговування.

У зв'язку з тим, що кількість пристроїв постійно зростає, а частотні ресурси частинами різного розміру розподілені між усіма безпроводними технологіями, виникає необхідність підтримки значної кількості цих технологій одним структурним елементом гетерогенної мережі LTE. Цим структурним елементом може бути мультистандартний шлюз. Загальний принцип роботи представлено на рис. 2.3.

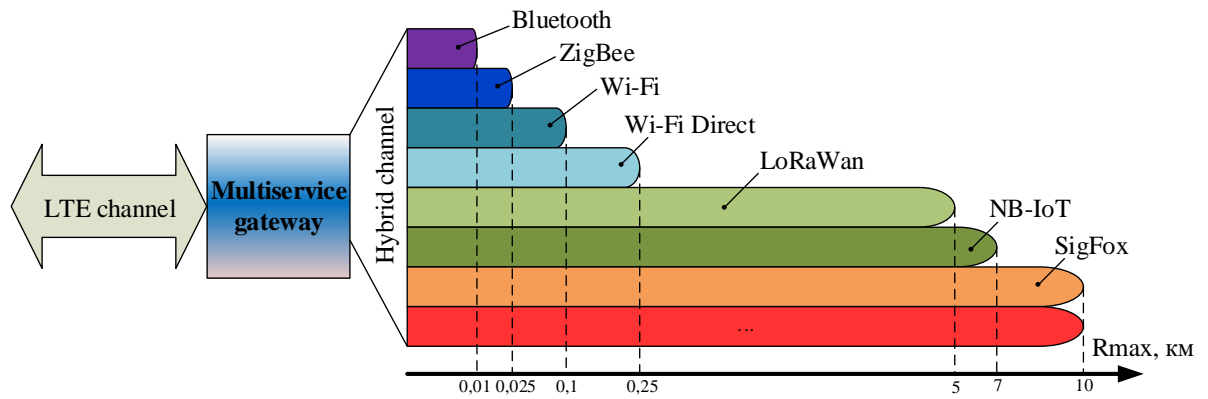


Рис. 2.3. Принцип функціонування мультистандартного шлюза з підтримкою різних технологій передавання даних [79]

З рис. 2.3 можна зрозуміти, що шлюз має з одного боку LTE канал обміну інформацією з базовою станцією, а з іншого боку – набір технологій, що разом із технологією LTE утворюють загальну гетерогенну мережу. Принцип роботи такого шлюза полягає у «розпакуванні» переданих за технологією LTE даних та «запакуванні» в будь-яку іншу, підтримувану ним, технологію і навпаки. При цьому, ключовою особливістю надання переваги тій чи іншій технології є доступність передавання провідним чи безпроводним шляхом, тобто можливість використання Ethernet протоколу передавання даних.

У роботі, на відміну від відомих принципів роботи шлюзів M2M, у яких дані збираються та автоматично передаються, пропонується удосконалити процес передавання та обробки даних на самому шлюзі. Зокрема, мультистандартний шлюз прийматиме дані для передавання до базової станції від головних датчиків кожного кластера та сортуватиме, прийняті від них дані, по чотирьох чергах так званих буферів пам'яті.

Такий підхід пов'язаний із тим, що сьогодні M2M трафік класифікуються як критично важливі дані реального часу та неважливі дані нереального часу. Черги різного пріоритету з різними вимогами QoS наведено на рис. 2.4.

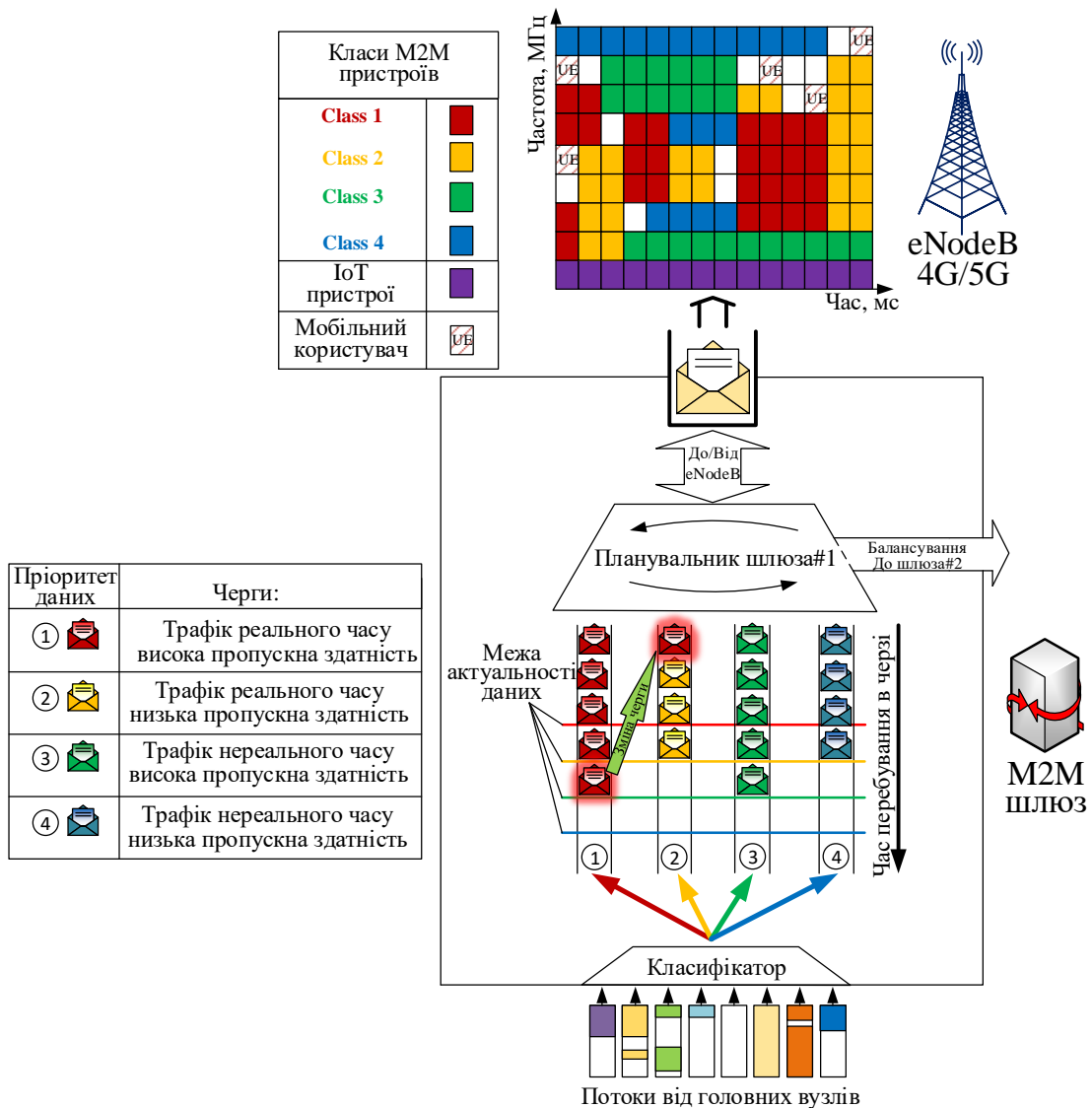


Рис. 2.4. Кластеризація та пріоритезація M2M трафіку на нововведеному мультистандартному шлюзі [79]

Тривалість перебування даних у чергах фіксується шлюзом і впливає на допустимий час обслуговування M2M датчика. Послідовність звільнення кожної з черг залежить від типу (пріоритету) трафіку, який вона містить, а також від максимально допустимого часу передавання встановлених згідно вимог QoS користувача цих даних із врахуванням часу перебування їх у черзі на шлюзі. Загалом, для гарантованого обслуговування даних M2M шлюзом та ядром мережі LTE за критерієм часу обслуговування повинна виконуватися наступна нерівність:

$$t_{E2E(QoS)_{LTE}} \leq t_{GW_{черги_i}} + t_{BS_i}, \quad (2.1)$$

де: $t_{E2E(QoS)_{LTE}}$ - допустимий час обслуговування трафіку в межах архітектури LTE, $t_{GW_{черги_i}}$ - час перебування даних i -го пристрою в черзі на мультистандартному шлюзі; t_{BS_i} - час передавання першої «порції» даних в межах кадру LTE. Час передавання першої «порції» даних в межах кадру залежить від номера кадру, в межах якого буде починатися передавання даних для i -го пристрою та номер зарезервованого субкадру (детальне пояснення розглядатиметься у розділі 3.1).

Перекидання даних пристрою з однієї черги в іншу відбувається у тому випадку, коли допустимий час обслуговування наближається до критичного значення.

Головні датчики, які надсилають дані до мультистандартного шлюза, збирають дані від дочірніх датчиків в межах кластеру. Як правило, приналежність до кластеру, а також розмір кластеру можуть змінюватися у зв'язку із необхідністю вибору нового головного датчика. Новий головний датчик може перевибиратися. Для цього поточний головний датчик повідомляє мультистандартний шлюз. Шлюз, у свою чергу, надсилає відповідні інструкції всім датчикам в межах кластеру головного датчика, якого потрібно замінити, а також датчикам сусідніх кластерів. Вибір нового головного датчика може здійснюватися шляхом аналізу таких параметрів як: рівень заряду батареї і стан радіоканалу із мультистандартним шлюзом (вибір головного вузла може базуватися і на інших критеріях, а також може бути автоматизованим з інтелектуальною логікою управління, що наведено у підрозділі. 2.2). Зокрема принцип вибору нового головного датчика на основі параметру рівня заряду батареї показано на рис.2.5.

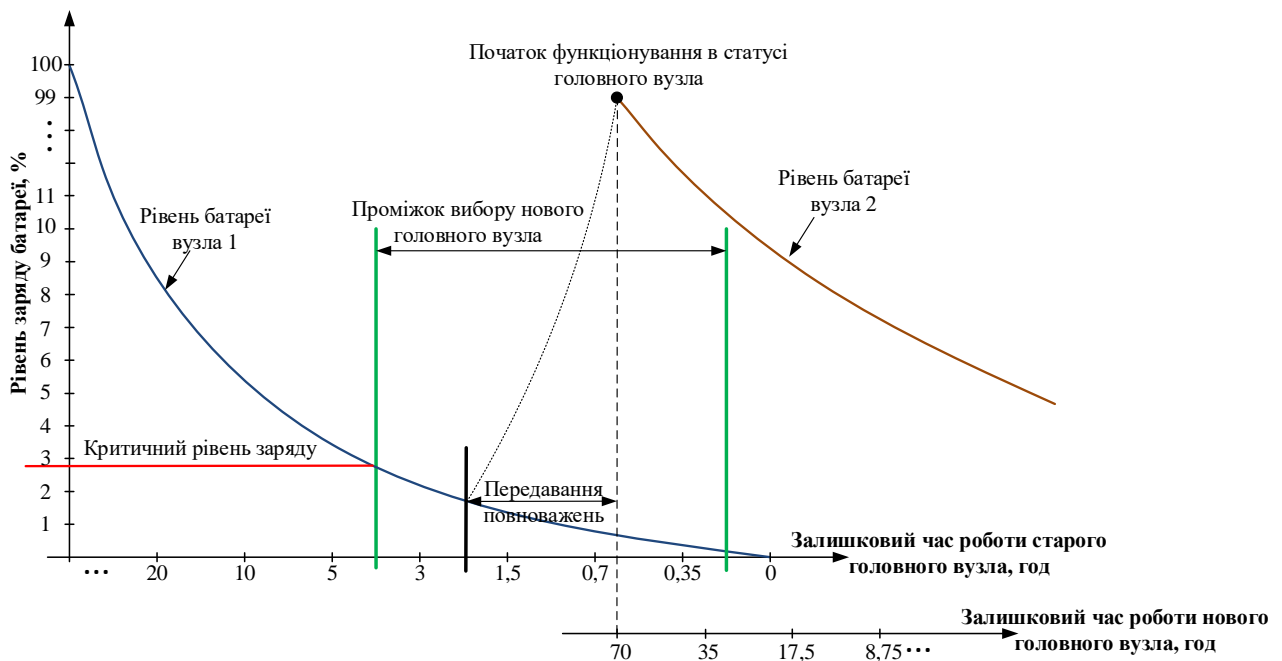


Рис. 2.5. Принцип вибору нового головного датчика на основі параметру рівня заряду батареї [79]

При надходженні на M2M шлюз повідомлення про необхідність вибору нового головного датчика, шлюз збирає інформацію про стан радіоканалу між ним та кожним датчиком в межах кластеру, де ще функціонує головний датчик, функції якого потрібно змінити. Цю ж інформацію він вимагає надіслати йому і датчикам сусіднього кластеру, по відношенню до кластеру, якого потрібно переформувати. Також мультистандартний шлюз вимагає від цих же датчиків інформацію про поточний рівень заряду батареї. Далі відбувається аналіз зібраної інформації, на основі якої мультистандартним шлюзом генерується повідомлення про надання нового функціонального статусу датчику, який надалі виступатиме в ролі головного. Після надсилання цього повідомлення новому головному датчику, відбувається переформування кластерів, в межах яких збиралася інформація про стан радіоканалу та поточний рівень заряду батареї від розташованих в межах них датчиків. При переформуванні кластерів відбувається визначення приналежності до утворених кластерів датчиків, які до переформування функціонували на території, що належала «старим» кластерам. Після повноцінного утворення кластерів, передавання даних від M2M датчиків

через новообрані головні датчики, які мають відповідний канал зв'язку (згідно підтримуваної технології) із мультистандартним шлюзом, відбувається у звичному режимі.

Слід зауважити, що на визначення нового головного датчика впливають і підтримувані ним безпроводні технології передавання даних. При покупці та встановленні нових (додаткових) M2M датчиків слід брати до уваги і можливість безпроводних технологій [80] у забезпеченні максимально можливої (необхідної) пропускної здатності.

2.1.2. Балансування навантаження між базовими станціями LTE з допомогою M2M шлюзів та технології Wi-Fi Direct

У випадку, коли в ресурсній сітці базової станції немає доступних радіоресурсів (рис. 2.6 а) для задоволення умови (2.1) про це повідомляється шлюз, який, використовуючи технологію Wi-Fi Direct, пересилає M2M трафік на обслуговування до іншого шлюза, що знаходиться в зоні обслуговування малої комірки (фемтокомірки) у якій в даний момент є необхідні частотно-часові ресурси для обслуговування (рис.2.6 б). В такий спосіб відбувається балансування навантаження між шлюзами для гарантованого обслуговування пристроїв в умовах недостатності каналних радіоресурсів базової станції.

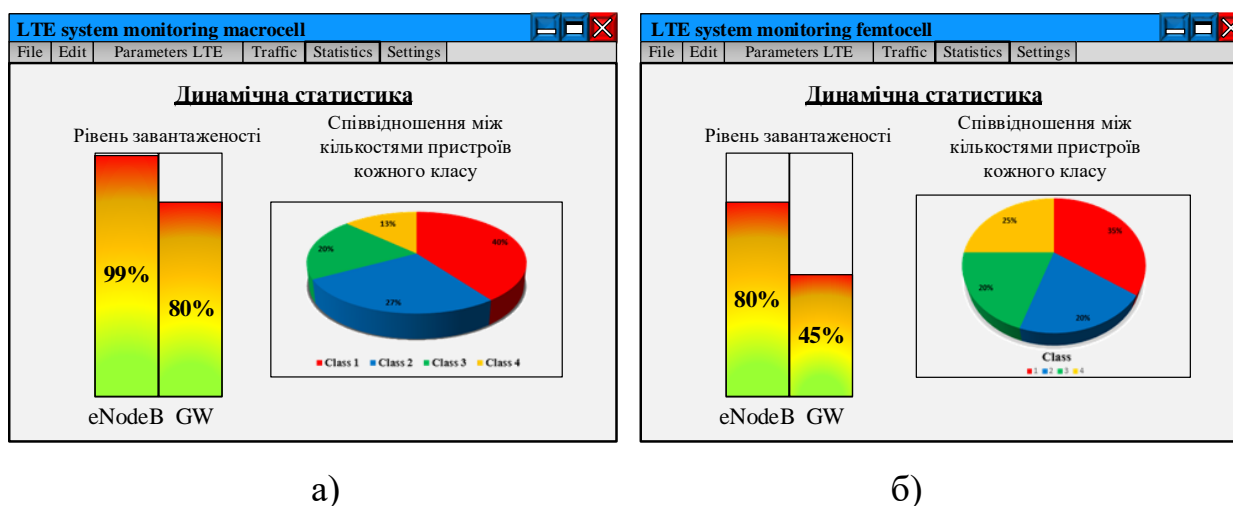


Рис.2.6. Завантаженість базових станцій макрокомірки а) та фемтокомірки б) та підключених до них шлюзів

За умов, коли пристрій не має змоги напряму забезпечити зв'язок через базову станцію, але при цьому поруч розташований інший пристрій (рис. 2.7), який має хороший стан каналу, останній може виступити в ролі ретранслятора. В такий спосіб збільшується зона покриття базової станції.

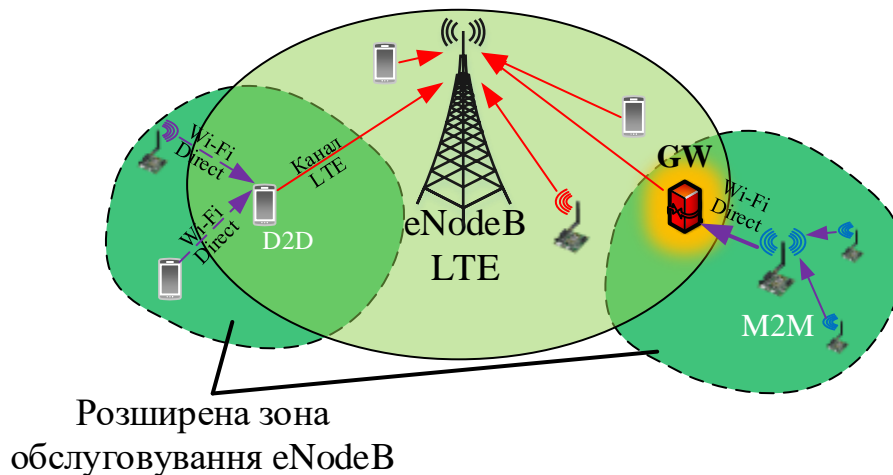


Рис. 2.7. Збільшення зони покриття базової станції [79]

У роботі розглянуто адаптацію протокольних стеків LTE і Wi-Fi Direct. При застосуванні технології Wi-Fi Direct M2M пристрій, який об'єднав навколо себе групу пристроїв буде називатися власником групи GO (Group Owner). Для поєднання протокольних стеків вибрано міст на рівні GO, між Wi-Fi Direct MAC і LTE при використанні протоколу конвергенції пакетних даних (PDCP). Для цього є три причини: 1) LTE пакети зашифровані і перевіряються на цілісність в PDCP за допомогою ключів, які відомі тільки клієнту і eNodeB (evolved NodeB). Таким чином, інші абонентські апарати не можуть розшифрувати LTE пакети, що проходять через Wi-Fi мережу; 2) Нововведений шлюз може обробляти блок пакетних даних (PDU) в шарі PDCP; 3) MAC рівень Wi-Fi Direct забезпечує надійний і безпечний сервіс передачі, і може здійснювати ретрансляцію кадрів на рівні MAC. Рис. 2.8 демонструє процес проходження пакету в обох напрямках – по висхідній і низхідній лініях зв'язку. Слід зазначити, що в результаті поєднання LTE і Wi-Fi операції передачі даних розділені. Відповідно, GO використовує ACK/NACK, щоб забезпечити передачу всього LTE трафіку, тому операції ARQ/HARQ проводяться тільки

шлюзом, в іншому випадку обмін блоками даних відбувається тільки між GO і eNodeB. Аналогічні механізми ACK і NACK використовуються Wi-Fi Direct для передачі LTE блоків PDU.

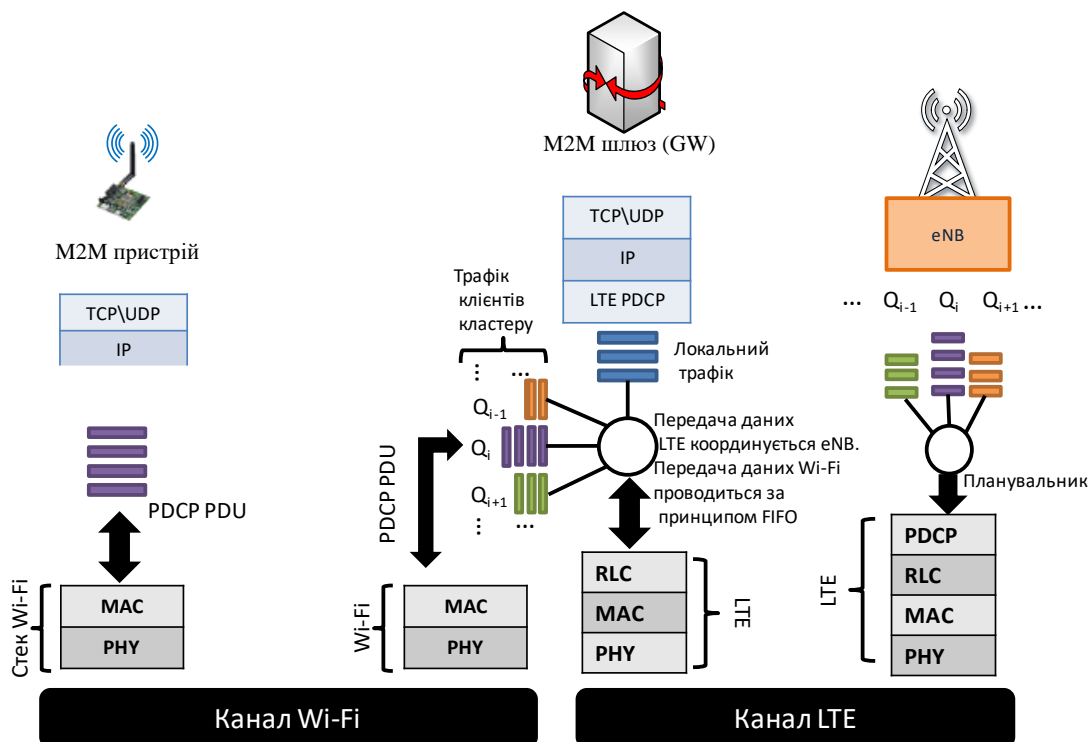


Рис. 2.8. Проходження даних між шлюзом M2M і eNodeB [81]

Uplink. Що стосується висхідного каналу запитів на передачу, то в них клієнти відправляють Scheduling Request (SR) або звіт про статус буфера BSR (Buffer Status Report) до GO, який буде направлений на eNodeB. Для цього, вони включають свої запити управління в 802,11 кадри, використовуючи один з використовуваних в даний час значень підтипу в полі управління кадром заголовка MAC. eNodeB використовує DCI (Downlink Control Information), щоб повідомити UE або M2M пристрій щодо їх частотно-часових ресурсів у низхідних/висхідних лініях зв'язку. Так як шлюз є єдиним членом, який слухає канал LTE, він отримує DCI і оновлює клієнтам інформацію по диспетчеризації, отриману з eNodeB, використовуючи 802,11 кадр управління з того ж підтипу значення, яке використовується M2M пристроєм, інкапсулюючи SR і BSR повідомлення в Wi-Fi Direct кадр. За замовчуванням в 802,11 MAC-адреса має бути формально призначена eNodeB, щоб використовуватись як

додаток до MAC-адреси відправника і одержувача в 802,11 кадрі. Таким чином, корисне навантаження по висхідній лінії передачі здійснюється за допомогою технології Wi-Fi Direct і автоматично відправляється до шлюза GW LTE. Шлюз витягує PDCP блоки PDU, передає їх по RLC і направляє до eNodeB в попередньо призначеному часовому інтервалі. GW передає пакети на eNodeB з C-RNTI адресою пристрою з метою спрощення ідентифікації реального джерела пакетів для eNodeB. Так як пакети даних LTE зашифровані і перевіряються на цілісність немає ускладнень системи безпеки.

Downlink. eNodeB передає пакети з допомогою клієнтської C-RNTI адреси, але вибирає схему модуляції і кодування (MCS) відповідно до якості каналу M2M шлюза. Так як шлюз проінформований про планування для його клієнтів, він прослуховує канал по низхідній лінії зв'язку, щоб приймати пакети, що належать до всіх членів кластера. Потім шлюз інкапсулює PDCP PDU в звичайні фрейми даних Wi-Fi, що включають в себе MAC-адресу шлюза, проміжних і головних пристроїв, і, за замовчуванням, MAC-адресу eNodeB. Таким чином, шлюз може посилати трафік LTE клієнтам, а клієнти можуть виявити, що корисне навантаження містить PDCP PDU за наявністю MAC адреси eNodeB в кадрі Wi-Fi Direct.

2.2. Алгоритм управління потоками даних на основі кластеризації, пріоритезації та агрегації M2M трафіку в мережі 4G/5G

Агрегування M2M даних в проміжних вузлах дає змогу вирішувати ряд проблем, пов'язаних зі споживанням енергії вузлами мережі. Значна частина споживаної електроенергії витрачається вузлом мережі саме на передачу даних, а не на процес отримання даних від M2M пристроїв з навколишнього середовища і їх обробку. Тому, одним із шляхів зменшення енергоспоживання вузла є зменшення обсягу переданих даних та частоти передавання, що може бути досягнуто шляхом їх попередньої обробки в проміжних вузлах зв'язку, так званих головних вузлів. Агрегування даних в проміжних вузлах може бути

доцільно з тієї причини, що при досить щільному розміщенні M2M вузлів в сенсорному полі, дані від довколишніх вузлів з високою ймовірністю можуть збігатися, тобто мати надмірність. Це дозволяє об'єднати повністю або частково однакових повідомлень з метою зменшення обсягу переданих вузлами даних.

При виборі головного вузла враховується низка параметрів, зокрема, центральність відносно кластера та рівень батареї. На рис. 2.9 показано запропоновану архітектуру гетерогенної мережі 4G/5G на рівні доступу з кластеризацією пристроїв M2M. Важливим елементом даної архітектури є шлюз M2M, який має зв'язок між головними вузлами по каналу Wi-Fi та базовою станцією по каналу LTE. Основною перевагою шлюзів M2M є виконання функцій вибору головного вузла, групування різноманітних даних на класи послуг та балансування навантаження між шлюзами з метою передавання даних на недовантаженні базові станції 4G/5G. 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.

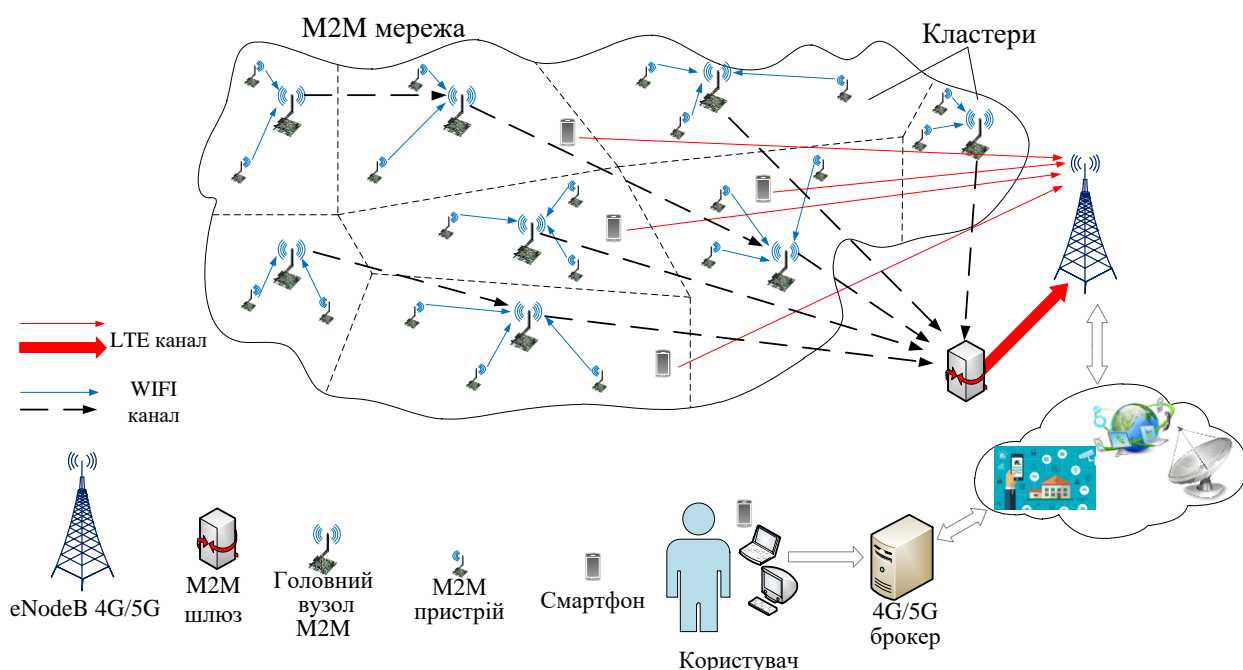


Рис.2.9. Архітектура гетерогенної мережі 4G/5G на рівні доступу з кластеризацією пристроїв M2M [82]

Нижче пропонується новий алгоритм вибору головного вузла кластера M2M мережі, який використовує одночасно переваги, як діаграм Вороного, так і методів нечіткої логіки [82]. У блок-схемі, на рис. 2.10 представлено виконання алгоритму кластеризація вибору головного вузла кластера для датчиків M2M в програмі «MatLab».

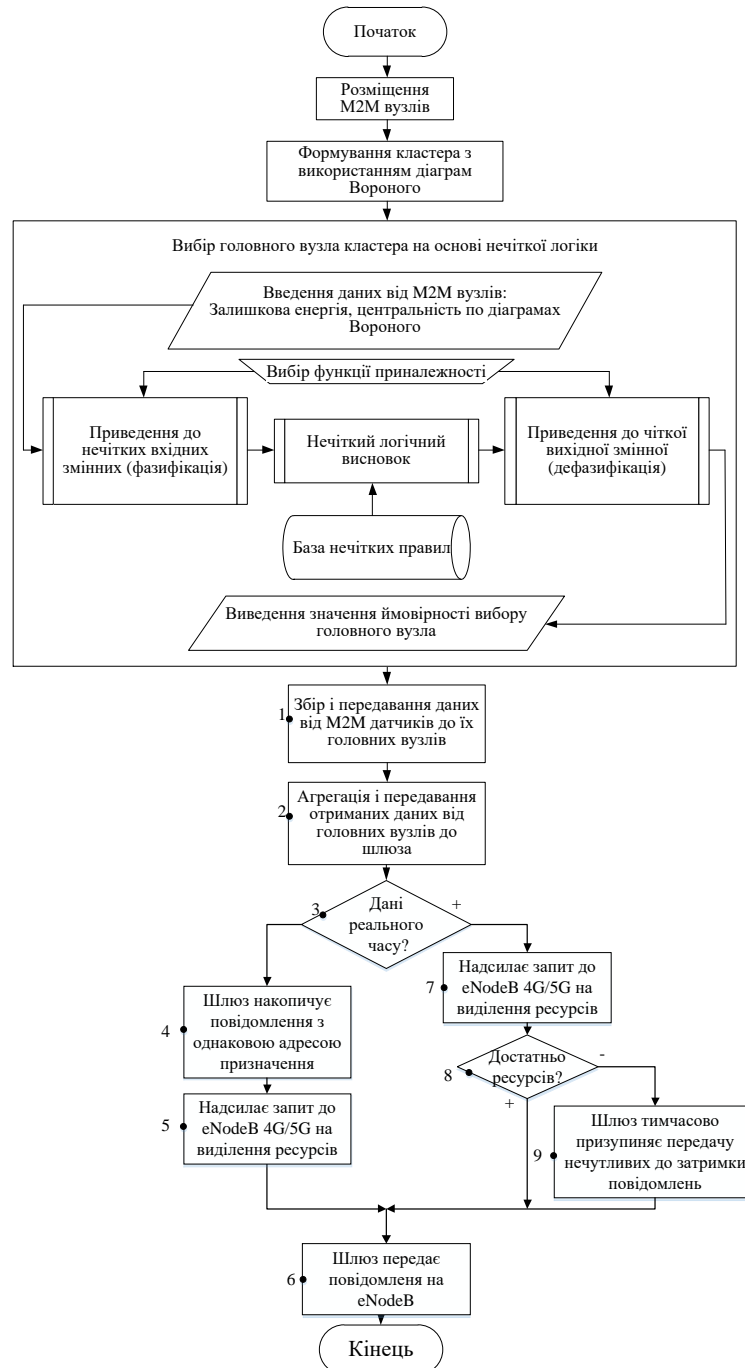


Рис.2.10. Блок-схема алгоритму кластеризації, агрегації та класифікації M2M пристроїв в гетерогенній мережі 4G/5G [82]

У розробленому алгоритмі формування кластера здійснюється на основі діаграм Вороного. У кожному раунді сенсорне поле поділяється у випадковому порядку. Після вибору головного вузла кластера в кожному кластері обчислюється відстань між сенсорними вузлами і головним вузлом кластера з використанням формули (2.2).

$$(D_i, C_j) = \sum_{i=1}^n \sqrt{(D_i - C_j)^2}, \quad (2.2)$$

де D_i – координати i -й M2M вузол в кластері ($i=1, \dots, n$), C_j координати j -го головного вузла j кластера ($j=1, \dots, k$).

У розробленому алгоритмі використовуються два параметри для вибору головного вузла кластера: залишкова енергія і центральність по діаграмах Вороного. Залишкова енергія і центральність по діаграмах Вороного оцінюються на основі методів нечіткої логіки. Контролер нечіткої логіки FLC (Fuzzy Logic Controller) складається з наступних компонентів (рис. 2.10): блоку фазифікації, бази правил, блоку нечіткого виведення і блоку дефазифікації. Програмну реалізацію функцій даного контролера міститимуть запропоновані шлюзи M2M, які виконуватимуть необхідні обчислення. Розглянемо роботу даного алгоритму докладніше. Від усіх M2M вузлів на вхід контролера нечіткої логіки надходять дані про стан кожного вузла.

Фазифікація – процес, що перетворює точні значення вхідних змінних в значення лінгвістичних (нечітких) змінних за допомогою застосування певних функцій приналежності. На виході з FLC ми будемо мати можливість вибору головного вузла в процентах. Як функцій приналежності для кожного значення всіх лінгвістичних змінних вибираємо трикутні функції приналежності. Після визначення функції приналежності і вхідних параметрів необхідно визначити базу правил для відповідних параметрів. На основі таблиці для нечітких множин зазначених параметрів, використовуючи програмний пакет Fuzzy Logic Toolbox (пакет нечіткої логіки в середовищі MatLab) [83], можна отримати функції приналежності.

Параметри системи нечіткого виведення і їх нечіткі множини

Тип змінної	Назва змінної	Терм множини	Тип функції приналежності	Значення функції приналежності
Вхідна	Залишкова енергія [0;100] %	Мала	трикутна	[0 ; 20 ; 50]
		Середня	трикутна	[20 ; 50 ; 80]
		Висока	трикутна	[50 ; 80 ; 100]
	Центральність по діаграмі Вороного [0 ; 100] %	Дальня	трикутна	[0; 25 ; 50]
		Середня	трикутна	[20 ; 50 ; 80]
		Близька	трикутна	[50 ; 75 ; 100]
Вихідна	Ймовірність вибору головного вузла [0 ; 100] %	Дуже мала	трикутна	[0 ; 5 ; 15]
		Мала	трикутна	[5 ; 15 ; 25]
		Більше малої	трикутна	[15 ; 25 ; 35]
		Менше сер.	трикутна	[25 ; 35 ; 45]
		Середня	трикутна	[35 ; 50 ; 65]
		Більше сер.	трикутна	[55 ; 65 ; 75]
		Невелика	трикутна	[65 ; 75 ; 85]
		Велика	трикутна	[75 ; 80 ; 95]
		Дуже велика	трикутна	[85 ; 95 ; 100]

На виході нечіткого контролера отримуємо ймовірність вибору головного вузла, яка виходить в результаті дефазифікації вихідного нечіткого рішення (рис.2.11).

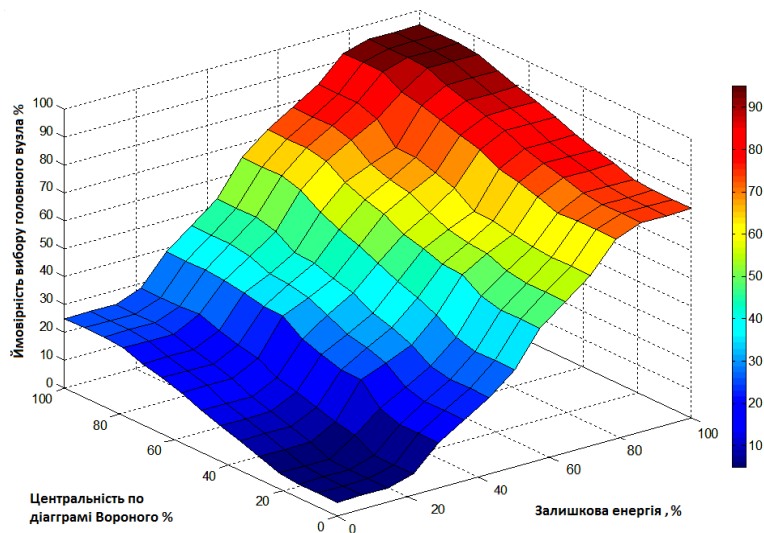


Рис.2.11. Залежність ймовірності вибору головного вузла від залишкової енергії і центральності по діаграмах Вороного [82]

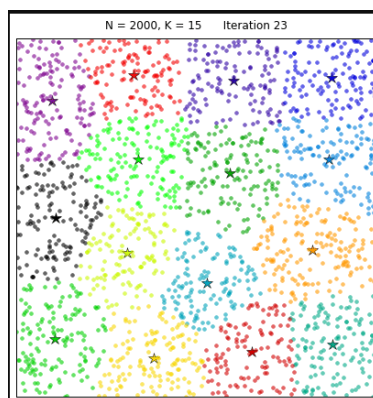


Рис.2.12. Моделювання процесу формування кластерів на основі центральності по діаграмах Вороного

Визначивши головний вузол, підлеглі вибирають до якого кластеру вони належатимуть. Для оптимального використання енергії, головні вузли періодично переобираються. Тому кожному датчику надається можливість стати головним в кластері. Завершальний етап налаштування структури мережі на основі кластерів полягає у формуванні розкладу передавання даних, використовуючи для цього часовий поділ. В такий спосіб відбувається уникнення колізії. Підлеглих датчиків повідомляють про час передавання даних шляхом надсилання широкомовного повідомлення. У такий спосіб відбувається інформування всіх вузлів про передачу даних. Кожен з датчиків передає дані тільки у строго визначені моменти часу. Всю отриману інформацію збирає головний вузол та передає на шлюз через канал Wi-Fi. Шлюз отримавши агреговані дані від M2M датчиків передає через канал LTE на базову станцію. Використання запропонованих шлюзів дає змогу зменшити сигнальну інформацію на базові станції 4G/5G, за рахунок того що дані агрегуються з низької смуги у вищу, а також функції моніторингу параметрів рівня батареї датчиків та їх розташування покладені не на базову станцію, а на шлюз. У свою чергу базова станція отримує агреговані дані від шлюза, який попередньо зробив групування сервісів M2M на запропонованих у роботі 4 класи з різними вимогами до QoS (таблиця 2.2). QCI_{M2M} (QoS Class Identifier) є міткою у пакеті IPv6, значення якого записується у полі ToS, DSCP [84]. Таке рішення дає змогу

планувальнику базової станції виділяти ресурси лише для 4 класів M2M, а не для всіх датчиків окремо.

Таблиця 2.2

Класифікація M2M

QCI_{M2M}	Тип	Пріоритет	Допустима затримка T_3 , мс	Допустима кількість відмов в обслуговуванні, $P_v\%$	Клас послуг сервісів M2M
1	Гарантований час передавання даних (GRB_{M2M}) трафік реального часу	1	10	0,01	L1
2		2	20	0,1	L2
3	Гарантований час передавання даних (GRB_{M2M}) трафік не реального часу	3	1000	5	L3
4	Не гарантований час передавання даних ($Non-GRB_{M2M}$) трафік не реального часу	4	$t_{невизначене}$	$P_{невизначене}$	L4

Розглянемо детально процес передавання даних при агрегації та класифікації згідно розроблено алгоритму (рис.2.10) [85]:

- M2M пристрої формують повідомлення і відправляють його на головний вузол (1).
- Головний вузол перенаправляє повідомлення на M2M шлюз (2).
- M2M шлюз аналізує повідомлення на предмет чутливості до затримок у відповідності з попередньо встановленими мітками (3).
- Якщо повідомлення не чутливі до затримок, M2M шлюз накопичує повідомлення з однаковою адресою призначення, об'єднує їх і після цього відправляє запит на eNodeB для виділення ресурсів (4,5).

- Після виділення ресурсів M2M шлюз передає об'єднане повідомлення через базову станцію на брокер (6).
- Якщо повідомлення чутливі до затримок, M2M відправляє запит на eNodeB для виділення ресурсів (7).
- Якщо ресурсів достатньо, M2M шлюз передає повідомлення через базову станцію на брокер (8,6).
- Якщо не достатньо, M2M шлюз тимчасово призупиняє передачу нечутливих до затримки повідомлень, тим самим звільняє ресурси для передачі чутливих до затримки повідомлень (9).
- Після виділення та звільнення ресурсів M2M шлюз передає чутливе до затримки повідомлення через базову станцію 4G/5G на брокер, який знаходиться у власній інфраструктурі оператора мобільного зв'язку для гарантування E2E QoS (6).

2.3. Підвищення ефективності використання частотно-часових ресурсів шляхом мінімізації кількості службової інформації в процесі агрегації M2M трафіку

При доповненні класичної архітектури мультистандартним шлюзом можливий варіант економії частини ресурсів, виділених під сигналізацію [86]. Запропонована методика виграшу по сигналізації забезпечує економію ресурсів у випадку виділення окремої частотної смуги для мультистандартних шлюзів. Виграш по сигналізації буде і при виділенні потрібних ресурсів базовою станцією мобільним користувачам і шлюзам у спільному каналі. Однак у цьому випадку такий спосіб виділення ресурсів, по-перше, завдасть додаткової обчислювальної складності контролеру базової станції, а, по-друге, значно вплине на кількість відмов у обслуговуванні. Тому при доповненні класичної архітектури M2M шлюзом доцільніше виділення окремої смуги для мультистандартних вузлів.

Для прикладу спочатку потрібно розібратися із співвідношенням корисних та службових даних при стандартному формування кадрів LTE. На основі проведеного аналізу у першому розділі відомо, що при різній ширині смуги радіочастот вони відрізнятимуться. Для детального дослідження цих співвідношень використано програмне забезпечення LTE Resource Element Visualisation v1.1, що дає змогу побачити розташування службових та корисних даних та обрахувати пропускну здатність з врахуванням модуляції, швидкості коду та кількості антен. На рис. 2.13 показано розташування корисних та службових даних в ресурсній сітці при ширині смуги 1,4 МГц та застосуванні однієї антени.

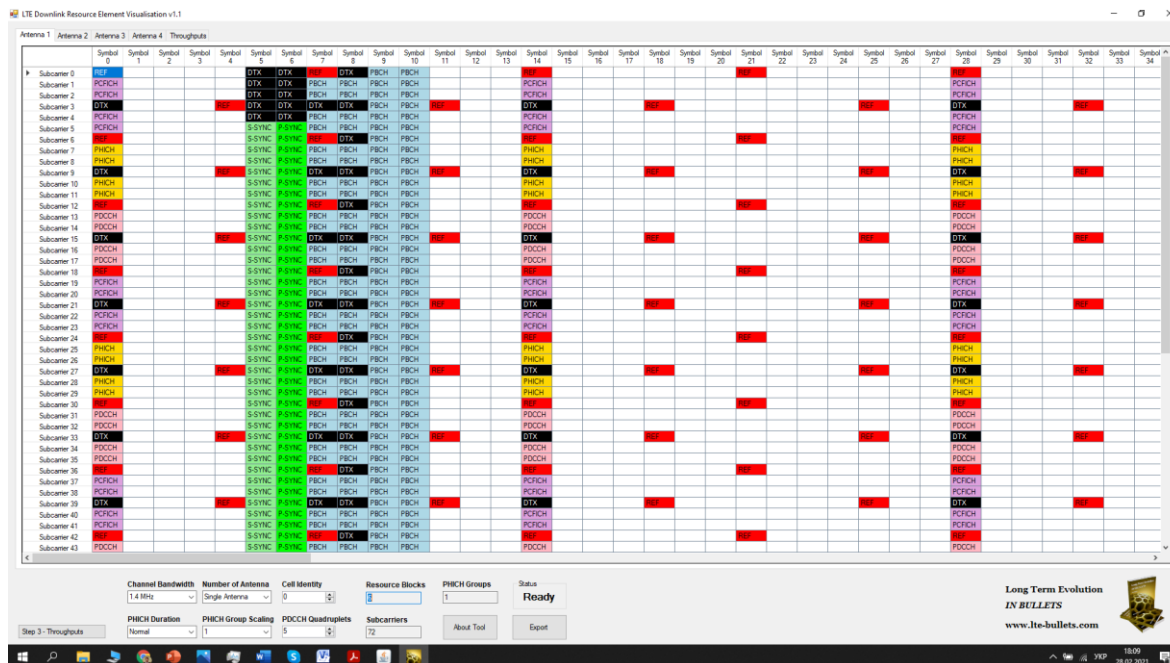


Рис. 2.13. Розташування сигналів для смуги 1,4 МГц в низхідному каналі

На рис. 2.14 зображено вікно програми, в якому представлено обраховані пропускні здатності. З нього можна зрозуміти, що за використання різних модуляцій та швидкості коду та однієї антени базова станція надасть різну пропускну здатність. При застосуванні модуляції 64QAM та максимальної швидкості коду досягається швидкості передавання 5,0616 Мбіт/с.

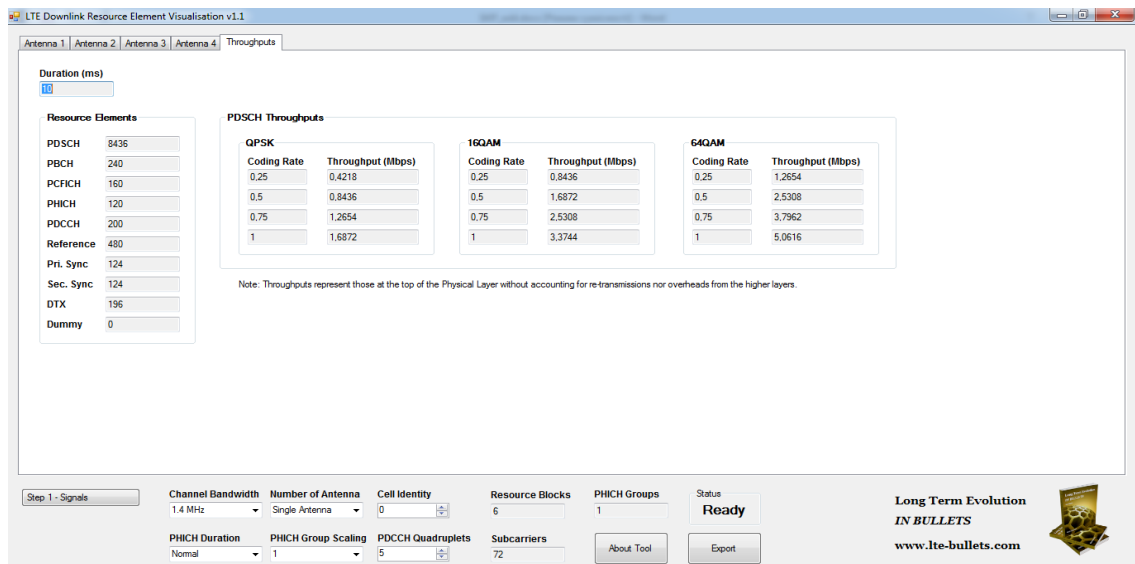


Рис. 2.14. Пропускна здатність низхідного каналу при 1,4 МГц за різних модуляцій та швидкості коду

Таблиця 2.3

Розподіл корисних та службових ресурсних елементів при ширині каналу 1,4 МГц та нормальному циклічному префіксі

Канал	Кількість ресурсних елементів	Канал	Кількість ресурсних елементів
PDSCH	8436	RS	480
PBCH	240	P-SS	124
PCFICH	160	S-SS	124
PHICH	120	DTX	196
PDCCH	200	Dummy	0

З дослідження випливає, що канал PDSCH для корисних даних займає 8436 ресурсних елементів. Всі інші службові канали, окрім PDCCH стандартизовані та неможуть бути оптимізовані. У роботі встановлено, що в процесі агрегації даних шлюзом можна оптимізувати сигналізаційні канали. Зокрема, таким каналом є PDCCH - фізичний канал керування в напрямку «вниз» призначений для передавання інформації для управління конкретним eUE, зокрема щодо планування його частотно-часових ресурсів для планувальника базової станції.

На основі дослідження встановлено, що він займає 200 ресурсних елементів в межах кадру. У більшості випадків їх розраховано за замовченням на одного користувача. На основі стандарту відомо, що мінімальна одиниця виділення частотно-часових ресурсів є один субкадр тривалістю 1 мс, що

займає в смузі 1,4 МГц 6 ресурсних блоків. Таким чином виходить, що максимум в кадрі тривалістю 10мс можна виділити ресурси для 10 UE (абонентських пристроїв). Цікавим є те, що в умовах зростання кількості користувачів, сигналізаційних PDCCH даних повинно бути більше, зокрема це досягається шляхом регулювання параметром PDCCH Quadruplets підтвердженням того наводиться у LTE Resource Element Visualisation v1.1, максимальним допустимим значенням PDCCH Quadruplets, якого є 41, що підтверджено на рис. 2.15

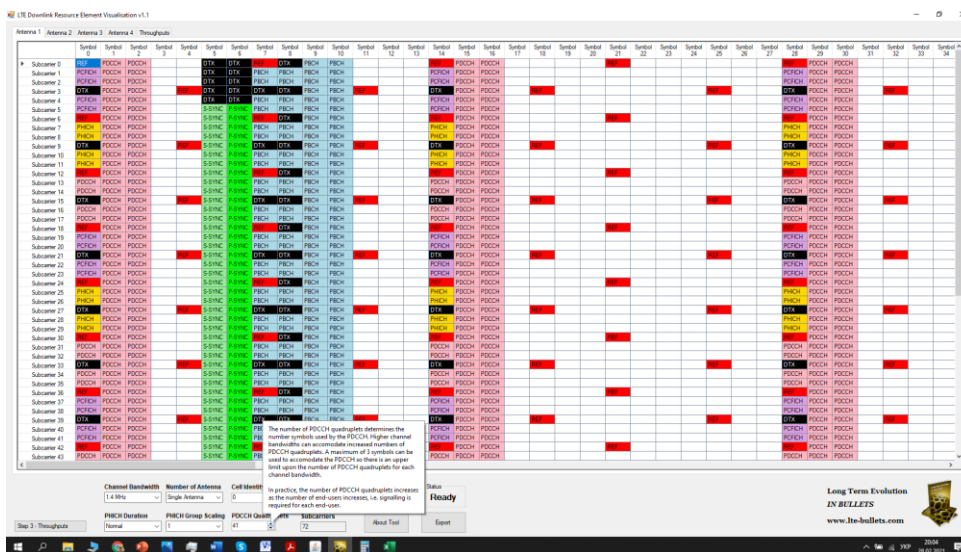


Рис. 2.15. Пропускна здатність низхідного каналу при 1,4 МГц за різних модуляцій та швидкості коду

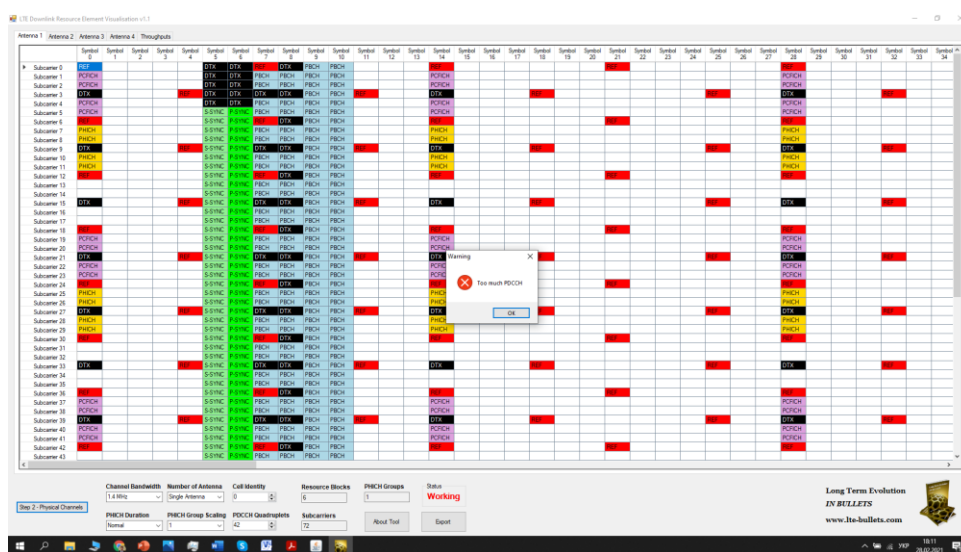


Рис. 2.16. Пропускна здатність низхідного каналу при 1,4 МГц за різних модуляцій та швидкості коду

Як бачимо з рис. 2.16 співвідношення кількості сигналізаційних і корисних даних відрізняється. Це означає, що об'єднання шлюзом декількох пристроїв M2M дасть змогу передавати цей же трафік мінімізуючи при цьому кількість виділеної службової інформації PDCCH каналу в процесі агрегації потоків. Таким чином, максимальний ефект економії ресурсів від кластеризації M2M пристроїв становитиме

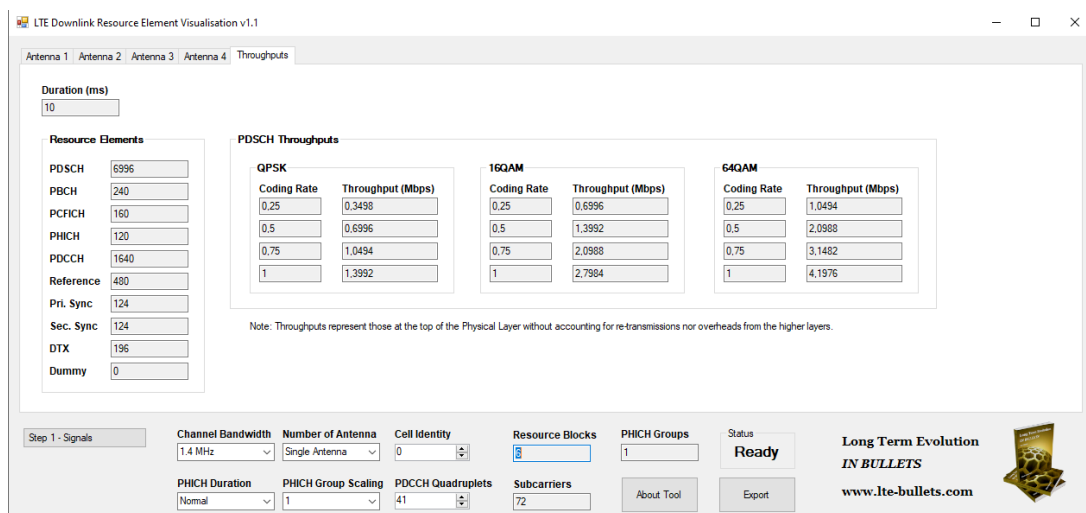


Рис. 2.17. Пропускна здатність низхідного каналу при 1,4 МГц за різних модуляцій та швидкості коду

Знайдемо співвідношення частки сигнальної інформації з кластеризацією та без кластеризації: $N_{RE_{сигн-без.кластер}}$.

$$K_{без.кластеризації} = \frac{N_{RE_{сигн-без.кластер}}}{N_{RE_{загальне-без.кластер}}}. \quad (2.3)$$

$$K_{з.кластеризацією} = \frac{N_{RE_{сигн-з.кластер}}}{N_{RE_{загальне-з.кластер}}}. \quad (2.4)$$

$$G_{ефективність} = \frac{K_{з.кластеризацією}}{K_{без.кластеризації}} \cdot 100\%. \quad (2.5)$$

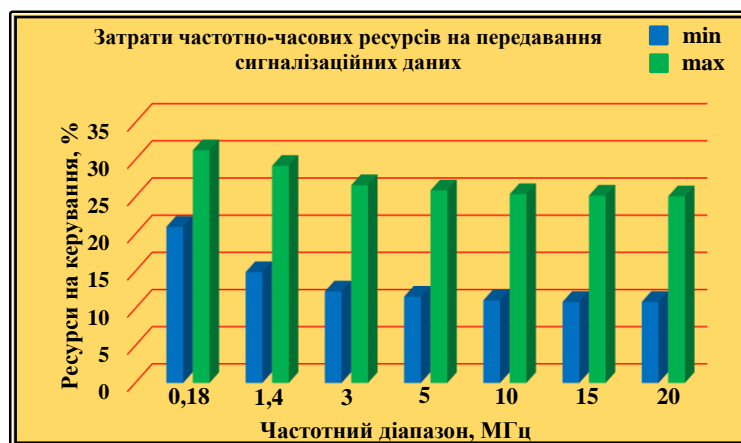


Рис.2.18. Затрати виділеної пропускнуої здатності на сигнали керування в умовах високої кількості обслуговування пристроїв (*min* - кількість сигналізації виділеної при кластеризації, *max* - кількість сигналізації без кластеризації)[86]

2.4. Формалізація процесу розподілу частотно-часових ресурсів мережі LTE між UE та M2M/IoT для забезпечення QoS

Одне з найважливіших питань які вирішуються у роботі є забезпечення якості та гнучкості надання сервісів користувачам в гетерогенній мобільній мережі LTE. Проте в умовах збільшення різновиду M2M трафіку і мобільних пристроїв, зростають вимоги до QoS. При забезпеченні необхідної кількості частотно-часових ресурсів для UE та M2M актуальним постає завдання оптимального розподілу в умовах їх обмеженості. Для цього в першу чергу потрібно формалізувати модель процесу розподілу ресурсів радіомережі. В сучасних гетерогенних мережах 4G/5G радіомережа складається з трьох основних компонентів (безпроводний канал передавання даних, базова станція, пристрій користувача/M2M шлюз).

Отже, опишемо структуру і аспекти роботи безпроводного каналу мереж 4G/5G. Як згадувалося у першому розділі, в існуючих мережах LTE на фізичному рівні розподіляються частотно-часові ресурси. У часовій області весь час роботи розділений на періоди рівної тривалості, так звані субкадри. Типова тривалість одного субкадра дорівнює 1-й мілісекунді (мс). Згідно технології LTE вчасне доставлення даних можна забезпечити шляхом гнучкого

розподілу частотно-часових ресурсів, які містяться в межах кадру тривалістю 10 мс. У частотній області вся смуга поділена на області рівної ширини, що дорівнюють 180 кГц. Мінімальною одиницею ресурсів є ресурсний блок. Безліч ресурсних блоків формують загальний канал передавання даних, ресурси якого можуть бути розподілені в радімережі між мобільними користувачами та M2M пристроями. Крім загального каналу зв'язку реалізовані службові канали, які вирішують завдання підтримки синхронізації і управління передачею абонентських пристроїв, оцінки якості каналу, забезпечення надійного передавання даних по ненадійному каналу та ін. Дані канали займають ресурси на початку і всередині ресурсних блоків.

Важливою відмінною рисою безпроводних каналів зв'язку є нестабільність його характеристик як і в часовій, так і в частотній області. Дана нестабільність викликана наявністю перешкод від роботи інших систем зв'язку, мобільністю користувача, і його оточення та ін. Даний факт призводить до того, що для одного абонента в різних ресурсних блоках може бути переданий різний обсяг даних. Для кожного ресурсного блоку на базовій станції обчислюється загасання поширення сигналу на основі інформації від службових каналів зв'язку. Для опису якості каналу на верхніх рівнях базової станції, отримане значення загасання сигналу для конкретного ресурсного блоку та абонента перетворюється в кодо-модуляційну схему. Кодо-модуляційна схема (Modulation Code Scheme або MCS) - комбінація модуляції (QPSK, QAM-16, QAM-64) і налаштувань завадостійкого кодування [87].

Вже згадана модель передбачає, що користувачі та M2M шлюзи можуть знаходити в різних умовах безпроводного каналу, викликані віддаленістю від базової станції, рухом абонента і забудовою місцевості. Послідовно розглянемо висхідні і низхідні безпроводні канали. В сучасних мобільних системах зв'язку завантаженість висхідного каналу є меншою в порівнянні з низхідною лінією зв'язку. Як наслідок, висхідний канал зв'язку вважається надійним і затримкою передавання запитів на сегменти потокового відео можна знехтувати. Проте дані

послуг M2M в більшості передаватимуться по висхідному каналі, що в умовах високої популярності та інтенсивності таких сервісів вимагатиме нових підходів щодо оброблення сигналізаційних даних базовою станцією LTE та розподілу ресурсів.

Аналітична модель приділяє велику увагу низхідному та висхідному каналу зв'язку, так як від його продуктивності залежить задоволеність користувачів в мережі. У даній роботі формалізовано модель радіоканалу, що володіє наступною властивістю.

Припущення 2.1: загасання при поширенні сигналу відбувається однаково по всій ширині смуги передавання даних для конкретного користувача UE та M2M шлюза в одному моменті часу.

У реальній системі дане припущення призводить до рівності значень обраних кодо-модуляційних схем для всіх ресурсних блоків в рамках одного субкадра конкретного користувача. Наслідком рівності кодо-модуляційних схем є можливість передавання однакового обсягу даних для всіх ресурсних блоків в субкадрі. Таким чином, стан безпроводного каналу користувача та M2M шлюза i можна охарактеризувати максимально можливою швидкістю каналу.

Твердження 2.1. Максимально досяжна швидкість каналу користувача та M2M шлюза (i) це швидкість передавання даних по безпроводному каналу, якщо всі доступні ресурси були виділені i -му користувачу та M2M пристроям.

Дана величина є аналогічною швидкості передавання даних, за умови, що i -й користувач UE/M2M шлюз знаходиться один на обслуговування в комірці LTE мережі. В подальшому максимально можливу швидкість каналу користувача UE чи M2M шлюза позначатимемо, як C_i . Для кожного користувача та M2M шлюза i існує випадковий процес зміни загасання при поширенні сигналу і завмирань від часу $L_i(t)$. На основі значення $L_i(t)$ в момент часу t на базовій станції підбирається кодо-модуляційна схема, таким чином, що ймовірність помилки при передаванні даних є знехтуваною малою

величиною. Обрана кодо-модуляційна схема визначає максимальну пропускну здатність каналу $C_i(t)$ в момент часу t .

Передбачається, що стан безпроводного каналу змінюється, таким чином, що в перебігу завантаження чи вивантаження із шлюза пакета k з сегмента j максимально досяжна швидкість каналу користувача та M2M шлюза i постійна:

$$C_i(t) = C_{i,j,k}, t_{i,j,k} \leq t \leq t_{i,j,k} + \Delta t_{i,j,k}, \quad (2.6)$$

де $t_{i,j,k}$ - момент часу початку завантаження користувачем та M2M шлюзом i пакета k з сегмента j , $\Delta t_{i,j,k}$ - тривалість завантаження користувачем та M2M шлюзом i пакета k з сегмента j , $C_{i,j,k}$ - максимально можлива швидкість каналу користувача та M2M шлюза i протягом завантаження пакету k з сегмента j .

Після визначення структури безпроводного каналу необхідно привести опис того як, використовуючи дану структуру, відбувається обмін даними між базовою станцією і призначеним для користувача пристроєм чи M2M шлюзом. Для цього розглянемо функціональну структуру базової станції. Основним завданням базової станції, є організація надійного передавання даних по ненадійному радіоканалу. Для вирішення даного завдання використовується структура, що складається з чотирьох рівнів (рис. 2.19):

- Рівень обробки пакетів.
- Рівень черг для передачі даних по безпроводному каналу зв'язку.
- Рівень доступу до середовища передавання даних.
- Рівень фізичного середовища.

Наведемо доставку пакета з даними від моменту його отримання на базовій станції, до моменту його появи на мережевому рівні користувачького пристрою чи M2M шлюза. З опорної мережі оператора пакет потрапляє на рівень обробки пакетів, даний рівень виконує дві функції. Першою функцією є стиснення заголовків пакетів транспортного і мережного рівня, для зменшення обсягу переданих даних по безпроводному каналу. Реалізація стиснення

заголовків пакету дозволяє нівелювати накладні витрати при передаванні даних по безпроводному каналу і вважати, що в пакеті немає ніякої надлишковості, що додається мережевими протоколами. Другою функцією є визначення абонента і передача інформаційної частини пакету в його черзі нижчого рівня.

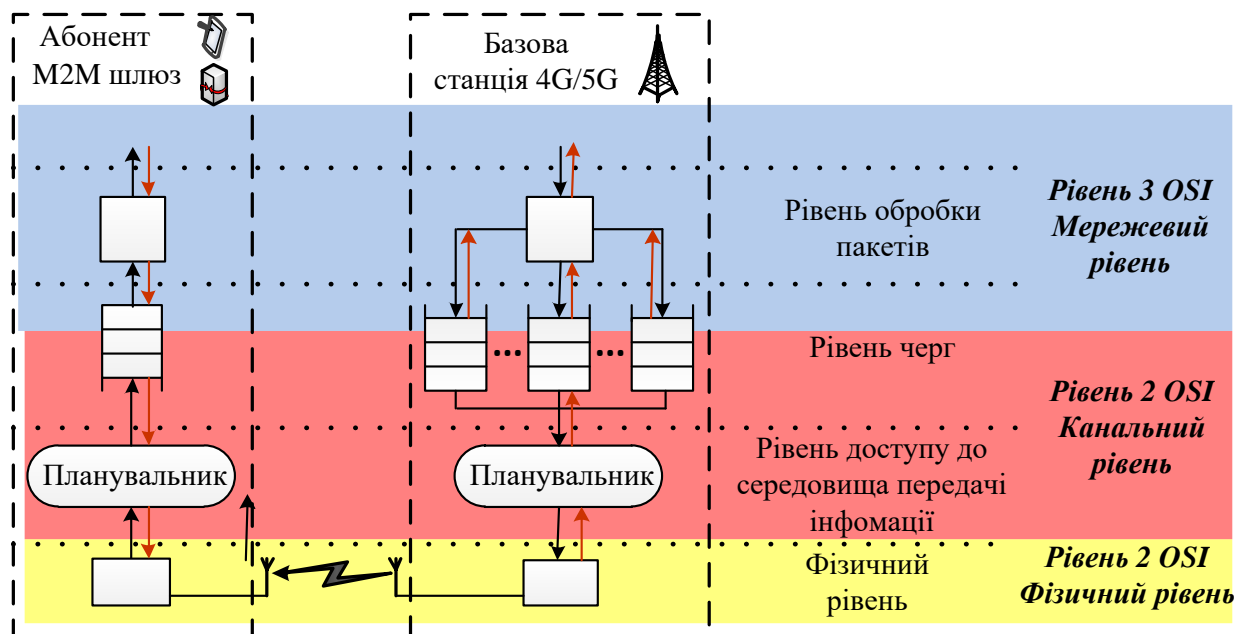


Рис. 2.19. Функціональна структура базової станції і абонента [88]

Нижче розташований рівень черг для передавання даних по безпроводному каналу зв'язку. На даному рівні для кожного користувача, підключеного до базової станції, розташована черга (буфер) для даних. Рівень черг є проміжним між рівнями обробки пакетів і канального рівня, що виконує роль тимчасового сховища даних при їх передачі по безпроводному каналу. Обслуговуванням черг займається нижчий рівень: рівень доступу до середовища передавання (Medium Access Control або MAC).

Рівень доступу до середовища передавання даних вирішує ключове завдання для системи в цілому: на основі інформації від рівня фізичного середовища і вищого рівня базової станції зробити розподіл ресурсів безпроводного каналу і забезпечити надійність передавання даних. Рішенням даного завдання займається планувальник ресурсів безпроводного каналу,

встановлений на базовій станції (в англomовній літературі використовується позначення Media Access Channel Scheduler або MAC Scheduler).

Планувальник в кожному субкадрі виробляє розподіл ресурсів радіоканалу (ресурсних блоків) у відповідність з деяким алгоритмом. Важливо відзначити, що планувальник не виділяє ресурси абонентам, у яких немає даних в даному субкадрі. У кожному кадрі формується карта розподілу ресурсних блоків, яка буде передана на фізичний рівень. Таким чином, роботу алгоритму планування можна представити у вигляді розподілу часток каналу між користувачами та M2M пристроями.

Сформована карта розподілу ресурсних блоків буде передана на рівень фізичного середовища, який забезпечить передавання даних з рівня черг в виділених частотно-часових ресурсів. Надалі, при коректній роботі всіх описаних рівнів базової станції пакет буде доставлений по безпроводному каналі на призначений для користувача пристрій і, пройшовши стек в зворотному порядку, стане доступний на мережевому рівні користувачького пристрою. Незважаючи на важливу роль планувальника, алгоритми планування не стандартизовані для існуючих систем зв'язку, тому кожен виробник базових станцій використовує власні реалізації алгоритмів планування. Створення подібних алгоритмів є відкритим завданням, так як вимоги до них дуже великі і не існує строгих теоретичних досліджень про їх максимальну продуктивність. В даний час відомі два евристичних алгоритми планування ресурсів: Proportional Fair і Round Robin [89]. Алгоритм планування Proportional Fair ставить своїм завданням забезпечення рівних швидкостей передачі даних для всіх активних користувачів. Алгоритм планування Round Robin забезпечує рівний доступ до ресурсів радіоканалу для всіх активних користувачів. Тому дисертаційна робота ставить своїм основним завданням дослідження методів планування, з метою підвищення ефективності використання частотно-часових ресурсів і, як наслідок, всієї безпроводної гетерогенної мережі для передачі потокового відео та масових M2M/IoT підключень.

Центральне положення, в спеціальній аналітичній моделі, займає алгоритм планування розподілу ресурсів безпроводного каналу, встановлений на базовій станції. Введемо визначення алгоритму планування:

Твердження 2.2. Алгоритм планування - це правило, відповідно до якого базова станція в момент часу t розподіляє частки ресурсів безпроводного каналу $\alpha_i(t) \geq 0$ для користувача/M2M шлюза i .

Таким чином, роботу алгоритму планування в момент часу t можливо описати вектором значень функцій: $A(t) = \{\alpha_i(t), i = \overline{1, N}\}$. Очевидним обмеженням на можливі значення функцій $\alpha_i(t)$ є наступна нерівність:

$$\forall t: \sum_{i=1}^N \alpha_i(t) \leq 1. \quad (2.7)$$

Нерівність (2.8) може бути інтерпретовано наступним чином: в будь-який момент часу роботи алгоритму планування загальний обсяг виділених ресурсів не перевищує доступного обсягу ресурсів для каналу передачі даних. Отже, для будь-якого користувача/M2M шлюза i , миттєва швидкість передачі даних в низхідному/висхідному каналі зв'язку $S_i(t)$ може бути обчислена в такий спосіб:

$$S_i(t) = (\alpha_i(t), C_i(t)). \quad (2.8)$$

Алгоритм планування в кожен момент часу вирішує завдання розподілу ресурсів безпроводного каналу. Для розв'язання даного завдання йому доступна інформація про передісторію, а саме частки виділених ресурсів каналу, значення максимально можливих швидкостей каналу і обсяг переданих даних для кожного користувача:

$$A(t) = A(S_i(\tau), C_i(\tau); \tau < t, i = \overline{1, N}), \quad (2.9)$$

де $A(t)$ є алгоритмом планування. У формулі (2.9) інформація про передісторію виділених часток безпроводного каналу і обсягах переданих даних для користувача i агреговані в значенні $S_i(\tau)$, так як дані параметри задаються співвідношенням (2.8).

Важливо відзначити факт, що для планувальника базової станції користувач в кожен момент часу може знаходитися в одному з двох станів: активному і неактивному. Користувач вважається активним, якщо у даного

користувача є дані для передачі в низхідному/висхідному каналі на базовій станції, інакше користувач вважається неактивним. У реальній системі, активність абонента так само визначається на основі наповненості черг. Важливо відзначити, що завантаження даних складається з послідовної передачі пакетів з відеоданими, і користувач вважається неактивним під час пауз між їх завантаженнями.

У даній дисертаційній роботі розглядається новий алгоритми планування ресурсів, який задовольняє представлений нижче набір властивостей:

– У кожен момент часу активному користувачеві гарантовано забезпечується виділення мінімальної частки ресурсів каналу α_i^{\min} :

$$\begin{cases} \alpha_i(t) = 0, & \text{користувач } i \text{ неактивний момент часу } t \\ \alpha_i(t) \geq \alpha_i^{\min}, & \text{користувач } i \text{ активний в момент часу } t \end{cases} \quad (2.10)$$

Мінімальна частка ресурсів каналу є величиною, відмінною від нуля: $\alpha_i^{\min} > 0$, і сума мінімальних часток ресурсів каналу для всіх користувачів не перевищує загального обсягу ресурсів, доступних для планування: $\sum_{i=1}^N \alpha_i^{\min} \leq 1$.

– Ресурси безпроводного каналу не можуть бути виділені неактивному абоненту.

– У кожен момент часу планувальник розподіляє всі доступні ресурси між активними абонентами:

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{в момент часу } t \text{ всі користувачі неактивні} \\ 1, & \text{інакше} \end{cases} \quad (2.11)$$

При розробці нових алгоритмів функціонування планувальника безпроводної мережі 4G/5G необхідно враховувати ряд особливостей M2M-трафіку. У специфікаціях консорціуму 3GPP сформульовані основні властивості M2M-трафіку [90-92]. Виділимо наступні характеристики, важливі з точки зору вирішуваних в роботі завдань:

- для M2M-пристроїв характерна низька мобільність;
- в більшості блоки даних M2M-трафіку мають невеликий розмір;

- для великого класу M2M-послуг характерна передача або одержання даних в певний проміжок часу;
- трафік ділиться на реальний та нереальний час;
- обмежений час життя пристрою.

Перед тим як перейти до алгоритму оптимального розподілу ресурсів, наголосимо на особливостях функціонування гетерогенної мережі LTE. Визначено, що найчастіше блоки M2M-даних мають вкрай малий розмір і генеруються великою кількістю різних M2M пристроїв. У зв'язку з цим, недоцільно згідно загально прийнятого стандарту виділяти планувальником базової станції eNodeB шість ресурсних блоків(6RB)в межах ширини каналу 1.4 МГц для передачі даних від одного M2M-пристрою, оскільки це призводить до не ефективного використання радіоресурсів. У роботі для вирішення подібної проблеми запропоновано проводити кластеризацію шляхом розгортання вище запропонованих M2M шлюзів з метою локалізації M2M трафіку в рамках кластера із подальшою агрегацією та класифікацію при передаванні в ядро LTE мережі, що дасть змогу планувальнику оптимально використовувати радіоресурс і зменшити сигнальне навантаження на eNodeB. Також, таке рішення дозволить об'єднати повністю або частково однакові повідомлення з метою зменшення обсягу переданих даних M2M пристроями.

Необхідно зауважити, що рішення планувальника про виділення мережевих ресурсів передусім ґрунтується на вимогах до QoS. Тому задача розподілу частотно-часових ресурсів у технології LTE повинна бути сформульована як задача розподілу RB мережі між UE та M2M пристроями залежно від заявлених вимог до пропускної здатності та параметрів QoS. Визначення класу, до якого належить той чи інший трафік UE пропонуємо проводити на основі параметру QCI (QoS Class Identifier).

У відповідності з цим, запропоновано алгоритм оптимального використання ресурсів базової станції в умовах збільшення трафіку, що генерується мобільними та M2M пристроями [86]. Під час його використання користувачські пристрої гарантовано отримують мінімальну пропускну здатність, для передавання даних. У разі наявності на базовій станції вільних

ресурсів, користувачам надається можливість збільшення швидкості. Більший об'єм частотно-часових ресурсів отримують ті пристрої, які по-перше передають трафік реального часу, для цього алгоритму такі користувачі розглядаються як пріоритетні, по-друге потребують широкої смуги пропускання і по-третє мають вищий індикатор якості каналу (CQI).

Запропонований алгоритм (рис. 2.20) доцільно застосовувати при нечіткому поділі трафіку, що виділяється мобільними та M2M пристроями, тобто за умов змішаного обслуговування, без строгого виділення окремих частотних ресурсів під користувачів мобільними пристроями та для M2M взаємодії.

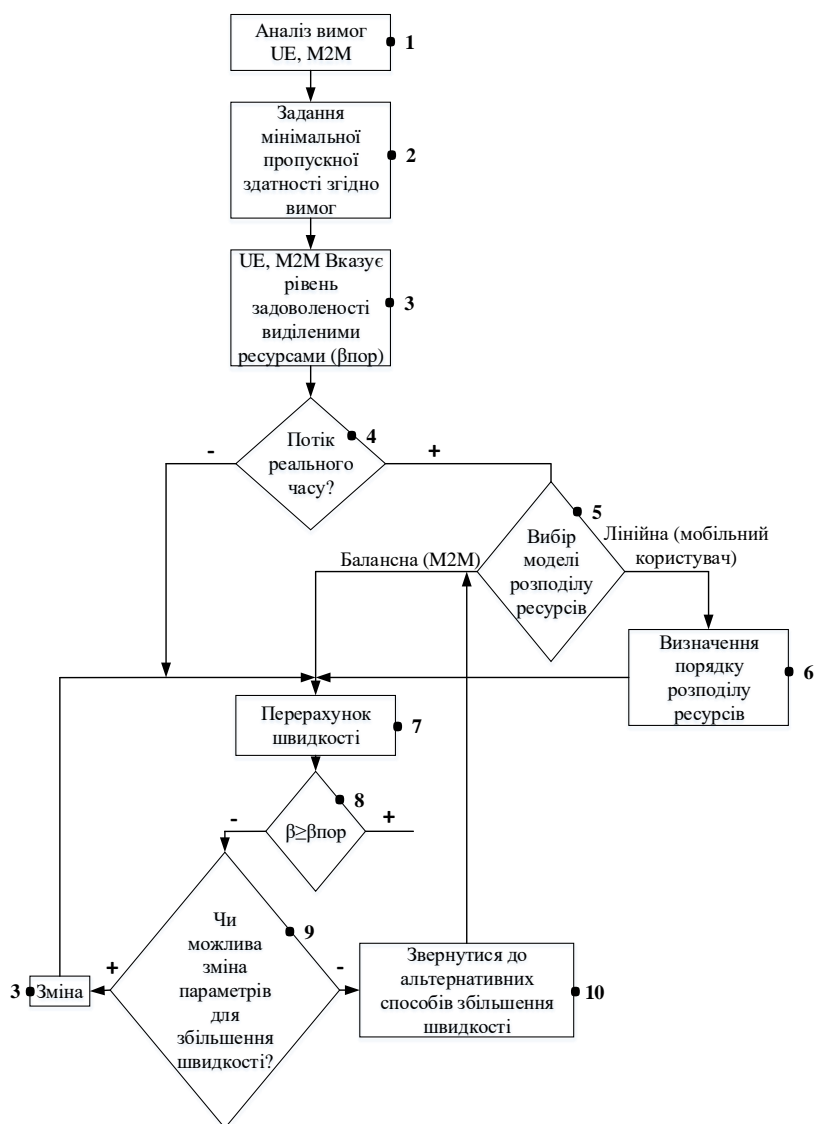


Рис. 2.20. Алгоритм оптимального використання ресурсів гетерогенної мобільної мережі

Опис послідовності роботи алгоритму:

1) Проводиться збір і аналіз на eNodeB інформації (блок 1), що стосується вимог надання ресурсів необхідних для передавання даних. Фіксується мінімальна затребувана кількість частотно-часових блоків, а також значення індикатора якості каналу, що в подальшому використовується для вибору адаптивної модуляції та швидкості коду.

2) Проаналізувавши вимоги базова станція призначає мінімальну пропускну здатність для UE та M2M пристроїв (блок 2).

3) eNodeB збирає інформацію від пристроїв про рівень задоволеності (блок 3) та приймає його в якості порогового значення ($\beta_{\text{пор}}$).

4) Базова станція аналізує трафік користувачів на приналежність до потоку реального часу (блок 4). Якщо це трафік нереального часу, то він поступає на перерахунок швидкості, оскільки виділені йому ресурси можуть бути використані в умовах перевантаженості мережі на користь трафіку реального часу. В такий спосіб відбувається відтермінування передавання інформації. В протилежному випадку потік даних поступає на подальшу класифікацію.

5) На цьому етапі відбувається (блок 5) сортування пристроїв на мобільні та M2M. Останні обслуговуються на основі балансної схеми, що полягає у балансованому наданні ресурсів.

6) Мобільні користувачі поступають на етап визначення порядку розподілу ресурсів (блок 6). На цьому етапі створюється черга, що звільняється відповідно до вагових коефіцієнтів, на основі яких і відбувається обслуговування. Ваговим коефіцієнтом в даному алгоритмі може виступати SLA договір, відповідно до якого і призначають пріоритети.

7) M2M та мобільні пристрої поступають на етап перерахунку швидкості (блок 7). У зв'язку з можливістю збільшення пропускну здатності за рахунок потоку даних нереального часу.

8) Після цього визначається значення задоволеності виділеними ресурсами та його порівняння із пороговим рівнем (блок 8). У випадку виконання умови $\beta \geq \beta_{\text{пор}}$ користувач обслуговується.

9) У протилежному випадку перевіряється можливість збільшення пропускної здатності за рахунок зміни параметрів передавання (блок 9) (адаптивної модуляції, швидкості коду). Якщо це можливо здійснити, то відбувається зміна параметрів (блок 3) і перераховується швидкість. Після чого знову відбувається перевірка виконання умови $\beta \geq \beta_{\text{пор}}$.

10) У випадку неможливості зміни параметрів пропонується альтернативний варіант збільшення швидкості (блок 10), що полягає у застосуванні принципів M2M взаємодії шлюзів, агрегації спектру чи переходу на обслуговування до менш завантаженої станції (балансування навантаження). За останнього варіанту, керуюча станція повідомляє керовану по інтерфейсу X2 про необхідність прийому на обслуговування користувача.

Для передавання даних від пристроїв IoT пропонується використовувати окремо виділену в межах 200 кГц вузькосмугову NB-IoT технологію, що розгортається поверх стандарту LTE з модифікованим процесом планування частотно-часових ресурсів, що базується на пріоритетах IoT класу [88].

У роботі [88] запропоновано поділяти IoT трафік пристроїв, аналогічно до M2M на 4 пріоритети з різними вимогами до E2E QoS (t). Пріоритет даних фіксуватиметься в полі ToS (Type of Service) пакету IPv6. Максимальне значення допустимої затримки для IoT трафіку I-го класу становить 100 мс, II-го – 1 с, III-го – 100 с, IV-го – 1000 с.

Передавання інформації в мережі LTE здійснюється за допомогою частотно-часових ресурсів, в яких розміщуються сигнали керування (сигналізаційні) та корисні дані. Виділення частотно-часових ресурсів для мобільних користувачів, IoT та M2M пристроїв в низхідному та висхідному каналах зв'язку згідно запропонованого алгоритму оптимального планування ресурсів показано на рис.2.21.

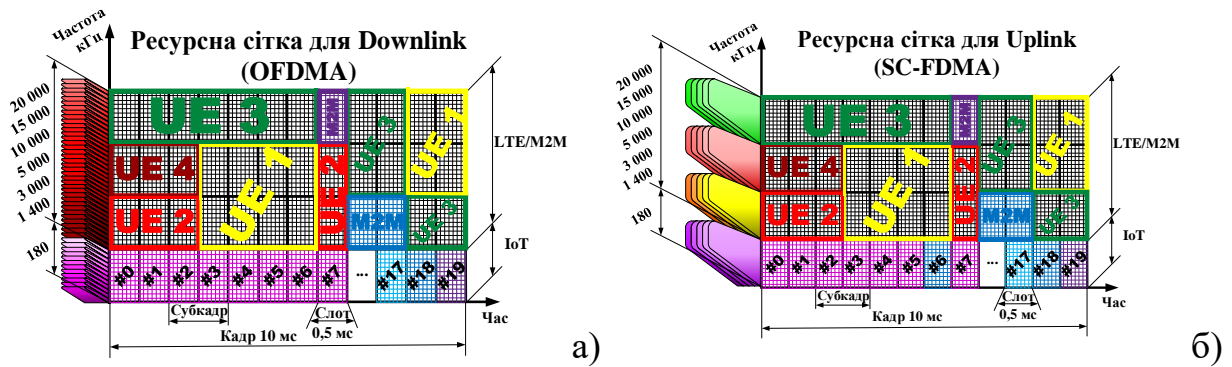


Рис.2.21. Виділення ресурсів для користувачів у низхідному а) та висхідному каналах б) [86,88]

При передаванні інформації від пристрою користувача до базової станції та у зворотному напрямку використовуються різні типи потоків (сигналізаційні і корисні). Їх розміщення для низхідного та висхідного каналів – різні.

На рис. 2.22 а) продемонстровано розташування корисних та сигналізаційних даних низхідного каналу в кадрі за частотного дуплексу для NB-IoT технології, що генерують трафік нереального часу з низькою пропускною здатністю. Кадр надсилається eNodeB по LTE каналу до шлюза, а той в свою чергу направляє дані до відповідного M2M пристрою.

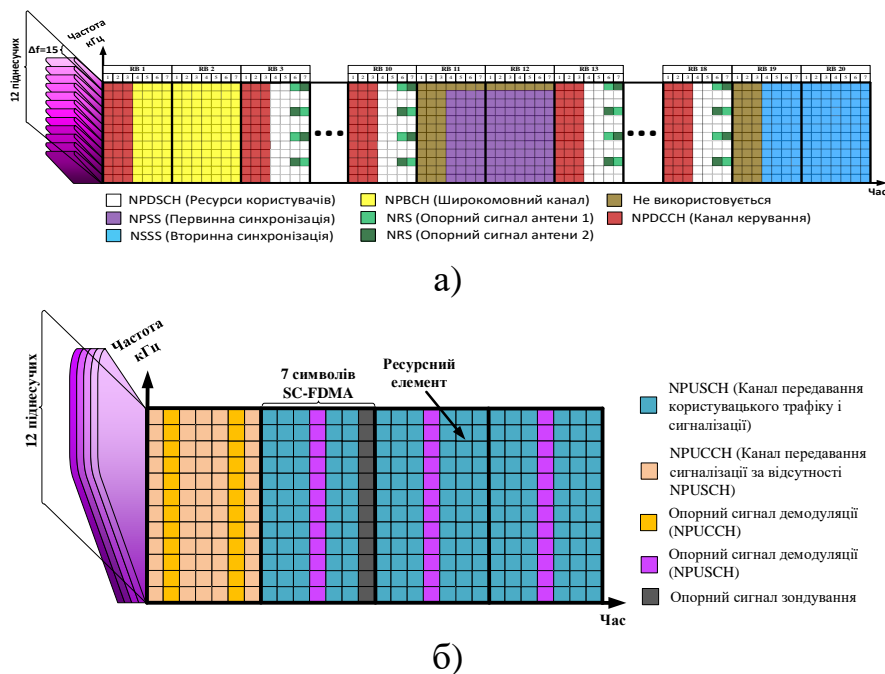


Рис. 2.22. Розташування сигналізаційних та корисних даних від M2M пристроїв у низхідному каналі а) та висхідному каналі б) [88]

У ресурсній сітці для пристроїв використовуються наступні канали:

- NPDSCH, що передає ресурси користувачів IoT пристроїв.
- NPSS передає первинну синхронізацію, що необхідна для фіксації номера кадру.
- NSSS відповідає за вторинну синхронізацію, що відповідає за номер підкадра.
- Широкомовний канал представлений каналом NPBSCH, що відповідає за набір параметрів (ідентифікатори комірок та параметри контролю доступу), необхідних для початкового доступу до середовища передавання.
- NRS переносить опорний сигнал від антен, який необхідний для визначення стану каналу.
- NPDCCH – канал керування, в якому базовою станцією вказується про кількість та розташування в ресурсних блоках каналного ресурсу для IoT пристроїв, а також в цьому каналі вказується часовий інтервал для випадкового доступу.

Для передавання інформації до базової станції використовуються наступні канали (рис. 2.22 б):

- PUSCH – канал передавання користувацького трафіку та сигналізації.
- PUCCH – канал керування користувацького трафіку та сигналізації за відсутності PUSCH.
- SRS – опорний сигнал зондування.

2.5. Розроблення методу оптимального розподілу частотно-часових ресурсів в мережах стандарту LTE на основі адаптивного вибору ширини смуги радіочастот

У роботі запропоновано метод оптимального розподілу частотно-часових ресурсів в мережах стандарту LTE, що базується на адаптивному виборі ширини смуги радіочастот [93]. Використання даного методу для планувальника базової станції дає змогу оптимально вибирати ширину каналу, в

якій ресурси одного субкадру будуть мінімально «простоювати». Для більш детального розуміння розглянемо приклад. Нехай абоненту треба забезпечити пропускну здатність, що рівна $R_{req} = 5 \text{ Мбіт/с}$ і він знаходиться в таких радіоумовах, в яких може отримати таку швидкість, оскільки його розташування забезпечує кодо-модуляційну схему 64 QAM та швидкість коду 666/1024. Однак базова станція може надавати послуги і на нижчій модуляції, якщо на ній забезпечується потрібна пропускна здатність. Розрахунок проведемо для кількості антен на передачу та прийом що рівна 2. В одному ресурсному блоці передається 7 символів.

За формулою визначаємо кількість ресурсних блоків, які треба передати в одному кадрі для забезпечення необхідної пропускної здатності при заданій модуляції та швидкості коду:

$$N_{reqRBframe} = \left\lceil \frac{R_{req}}{R_{pot}} \times N_{potRBframe} \right\rceil, \quad (2.12)$$

де: R_{req} - необхідна пропускна здатність, Мбіт/с; $N_{potRBframe}$ - загальна кількість ресурсних блоків у кадрі; R_{pot} - можлива пропускна здатність згідно умов розташування (таблиця 2.4), Мбіт/с.

Можлива пропускна здатність для абонента/M2M шлюза розраховується згідно наступної формули

$$R_{pot} = (N_{RB} \cdot 12 \cdot 7 \cdot MIMO \cdot Kod_{RATE} \cdot \log_2(Modul)) \cdot S, \quad (2.13)$$

де (S) відсоток корисних даних в кадрі ($S=0.75$), число виділених ресурсних блоків (N_{RB}) на протязі секунди, кількість ресурсних елементів (12·7, де 12 – кількість піднесучих, 7 – кількість символів), кількість антен $MIMO$, швидкість коду (Kod_{RATE}), позиційність модуляції ($\log_2(Modul)$).

Для знаходження кількості субкадрів, що необхідні для забезпечення потрібної пропускної здатності слід врахувати кількість ресурсних блоків, що є у кадрі при відповідній ширині каналу, а також загальну кількість субкадрів у

кадрі, що рівна 10. Тому формула для знаходження необхідної кількості субкадрів буде такою:

$$N_{reqSubFrame} = \left\lceil \frac{R_{req}}{R_{pot}} \times 10 \right\rceil, \quad (2.14)$$

де: R_{req} - необхідна пропускна здатність, Мбіт/с; R_{pot} - можлива пропускна здатність(див. таблицю 2.4), Мбіт/с.

Таблиця 2.4

Можлива пропускна здатність

CQI	Ширина каналу, МГц							
	0,2	1,4	3	5	10	15	20	100
	Корисна швидкість, Мбіт/с							
1	0,022	0,246	0,6413	1,0801	2,1769	3,2738	4,3707	21,853
2	0,034	0,379	0,9866	1,6616	3,3491	5,0366	6,7241	33,620
3	0,056	0,609	1,5868	2,6724	5,3865	8,1006	10,8146	54,073
4	0,089	0,973	2,5323	4,2648	8,5961	12,9273	17,2586	86,292
5	0,130	1,418	3,6916	6,2172	12,531	18,8454	25,1594	125,79
6	0,174	1,901	4,9496	8,3358	16,801	25,2671	33,7327	168,66
7	0,219	2,388	6,2157	10,468	21,099	31,7307	42,362	211,80
8	0,284	3,096	8,0574	13,569	27,351	41,1324	54,9137	274,56
9	0,357	3,892	10,129	17,059	34,384	51,7094	69,0344	345,17
10	0,405	4,416	11,494	19,357	39,017	58,6767	78,3361	391,68
11	0,493	5,374	13,985	23,553	47,473	71,3942	95,3145	476,57
12	0,579	6,312	16,427	27,666	55,762	83,8598	111,956	559,78
13	0,671	7,317	19,041	32,069	64,638	97,2069	129,775	648,87
14	0,759	8,274	21,533	36,265	73,0947	109,9243	146,754	733,770
15	0,8249	8,9853	23,383	39,3805	79,3743	119,368	159,3618	796,808

Необхідну кількість субкадрів, які треба зарезервувати в одному кадрі для забезпечення необхідної пропускної, зведено до таблиці 2.5. Підкреслену жирним шрифтом кількість субкадрів не можна виділити в межах одного кадру, через те, що згідно стандарту кадр може містити тільки 10 субкадрів. Тому надалі будемо робити акцент тільки на всі інші значення кількості субкадрів при відповідних комбінаціях CQI та ширини каналів.

Кількість субкадрів, що необхідна для задоволення у пропускній здатності абонента (5 Мбіт/с)

CQI	Ширина каналу, МГц							
	0,2	1,4	3	5	10	15	20	100
	Кількість субкадрів							
1	<u>2272,727</u>	<u>203,252</u>	<u>77,967</u>	<u>46,292</u>	<u>22,968</u>	<u>15,273</u>	<u>11,44</u>	2,288
2	<u>1470,5882</u>	<u>131,926</u>	<u>50,679</u>	<u>30,091</u>	<u>14,929</u>	9,927	7,436	1,487
3	<u>892,8571</u>	<u>82,102</u>	<u>31,51</u>	<u>18,71</u>	9,278	6,172	4,623	0,925
4	<u>561,7978</u>	<u>51,387</u>	<u>19,745</u>	<u>11,724</u>	5,817	3,868	2,897	0,579
5	<u>384,6154</u>	<u>35,261</u>	<u>13,544</u>	8,042	3,99	2,653	1,987	0,397
6	<u>287,3563</u>	<u>26,302</u>	<u>10,102</u>	5,988	2,976	1,979	1,482	0,296
7	<u>228,3105</u>	<u>20,938</u>	8,044	4,776	2,37	1,576	1,18	0,236
8	<u>176,0563</u>	<u>16,15</u>	6,205	3,685	1,828	1,216	0,911	0,182
9	<u>140,056</u>	<u>12,847</u>	4,936	2,931	1,454	0,967	0,724	0,145
10	<u>123,4568</u>	<u>11,322</u>	4,35	2,583	1,281	0,852	0,638	0,128
11	<u>101,4199</u>	9,304	3,575	2,123	1,053	0,7	0,525	0,105
12	<u>86,3558</u>	7,921	3,044	1,807	0,897	0,596	0,447	0,089
13	<u>74,5156</u>	6,833	2,626	1,559	0,774	0,514	0,385	0,077
14	<u>65,8562</u>	6,043	2,322	1,379	0,684	0,455	0,341	0,068
15	<u>60,6134</u>	5,565	2,138	1,27	0,63	0,419	0,314	0,063

Для обчислення значення «простою» субкадру використаємо наступну формулу:

$$Z = \frac{\left(\left[N_{reqSubFrame} \right] - N_{reqSubFrame} \right) \times R_{pot}}{1000}. \quad (2.15)$$

Обчислені значення «простою» занесено до таблиці 2.6. Знак «-» встановлено в тих комірках таблиці, де неможливо виділити субкадри в межах одного кадру (згідно виділених значень в таблиці 2.5).

Беручи до уваги значення, що вказані у таблиці 2.6, можна зробити висновок про те, що раціональне використання ресурсів базової станції буде у випадку вибору контролером ширини каналу та модуляційно-кодової схеми, при якій «простій» ресурсів буде мінімальним.

Кількість «простоюваних» біт у субкадрі

CQI	Ширина каналу, МГц							
	0,2	1,4	3	5	10	15	20	100
	«Простоювання», Мбіт/с							
1	-	-	-	-	-	-	-	0,016
2	-	-	-	-	-	0,0004	0,00379	0,017
3	-	-	-	-	0,0039	0,0067	0,0041	0,004
4	-	-	-	-	0,00157	0,0017	0,00178	0,036
5	-	-	-	0,00596	0,00013	0,0065	0,00032	0,07586
6	-	-	-	0,0001	0,0004	0,0107	0,0175	0,1187
7	-	-	0,0059	0,00234	0,0133	0,0135	0,0347	0,162
8	-	-	0,0064	0,00427	0,0047	0,0322	0,00488	0,0224
9	-	-	0,000648	0,00118	0,0187	0,0017	0,019	0,2951
10	-	-	0,0075	0,0081	0,028	0,00868	0,0283	0,3415
11	-	0,0037	0,0059	0,0206	0,0449	0,0214	0,04527	0,427
12	-	0,000499	0,0157	0,005053	0,0057	0,02884	0,0619	0,5099
13	-	0,00122	0,00712	0,01414	0,0146	0,0339	0,0798	0,5989
14	-	0,00791	0,01459	0,0225	0,023	0,0599	0,0967	0,6839
15	-	0,0031	0,020156	0,0287	0,02937	0,0694	0,1093	0,7466

Враховуючи те, що базова станція надає ресурси сервісам як реального так і нереального часу, можна сказати, що при обслуговуванні трафіку нереального часу «простій» субкадрів у кожному кадрі можна ліквідувати заповненням субкадру до повного його об'єму. В такий спосіб дані сервісу нереального часу дійдуть до точки доставки швидше і відповідно звільнять швидше всі ресурси базової станції, які вона резервувала для цього абонента. З сервісами реального часу складніше. Для них не можливо передбачити час закінчення сесії чи обсяг даних, які будуть переданими при сесії. Для того, щоб раціонально використовувати ресурси базової станції для трафіку реального часу можна виділяти ресурси (якщо така можливість взагалі є) в тій смузі частот, де «простій» найменший. Значення з таблиці 2.6 повинні обчислюватися контролером базової станції для кожного наступного кадру. Тоді раціональність використання частотно-часових ресурсів базової станції зросте.

Другим підходом, який забезпечує ефективніше використання частотно-часових ресурсів є розгортання M2M шлюзів, що дають змогу агрегувати M2M трафік та передавати їх у ширшій смузі радіочастот досягаючи меншого простою кадру шляхом раціональної класифікації та вибору необхідної пропускної здатності на шлюзі, детальний приклад показано у 3 розділі роботі при аналітичному дослідженні процесу оптимізації ресурсів в кадрах LTE.

2.5.1. Метод оптимального розподілу частотно-часових ресурсів за критерієм забезпечення гарантованої сталої в часі пропускної здатності потокам реального часу та мінімально допустимої пропускної здатності потоком не реального часу

У першому розділі дисертації було показано, що трафік в мережах LTE можна умовно розділити на трафік реального часу, який чутливий до затримок і повинен мати фіксовану швидкість передачі (мова, відеоконференції з різним ступенем якості і т.д.), і еластичний трафік, що відноситься до передачі даних, швидкість якого змінюється пропорційно пропускної здатності комірки, незадіяною в процесі передачі трафіку реального часу (скачування файлів, міжмашинного обміну даними і т.д.).

Саме властивості еластичного трафіку дають можливість істотно підвищити ефективність використання ресурсу передачі інформації. Це особливо важливо для перспективних мереж рухомого зв'язку, до яких відносяться мережі стандарту LTE, в яких в основному використовуються для користувача пристрої з інтелектуальними вузлами, що збільшують частку еластичного трафіку. Очевидно, що спільна передача різнорідного трафіку потребує нових засобів управління трафіку, що забезпечують задані показники якості обслуговування заявок. Найпростіший спосіб управління - це введення обмежувальних порогів на швидкість передачі еластичного трафіку даних.

Розглянемо процес побудови моделі [93].

Через C позначимо швидкість передавання інформації, що забезпечується технічними можливостями окремого фрагмента мережі стандарту LTE. Процес надходження заявок обмежимо одним потоком заявок на обслуговування трафіку реального часу і одним потоком заявок на передавання трафіку нереального часу. Прийmemo, що заявки на передачу трафіку реального часу надходять по певному закону розподілу з інтенсивністю λ_r . Для обслуговування одного запиту потрібно виділити такий частотно-часовий ресурс $S_i(t) = (\alpha_i(t), C_i(t))$ в певній ширині каналу з наявної смуги пропускання, яка забезпечить необхідну пропускну здатність запиту в розмірі c_r біт / с.

Також прийmemo, що процес надходження заявок на передачу даних нереального часу також підпорядковується певному закону з інтенсивністю λ_{nr} . Для обслуговування однієї заявки з наявної вільної пропускну здатності комірки виділяється максимально можливий ресурс в розмірі c_{nr} біт/с, що задовольняє нерівності $c_1 \leq c_{nr} \leq c_2$. Величини c_1 і c_2 задають відповідно мінімальну і максимальну швидкість завантаження файлів, прийmemo, що $c_1 \leq c_2$.

У моделі також прийнято, що заявки на передавання трафіку реального часу мають відносний пріоритет при використанні ресурсу передачі інформації. Позначимо через i_r і i_{nr} число заявок на передачу трафіку, відповідно, реального часу і нереального часу, що знаходяться на обслуговуванні в момент надходження заявки на передачу трафіку реального часу. Якщо у мережі LTE є достатньо вільний радіоресурс, тобто виконується нерівність $i_r c_r + i_{nr} c_2 \leq C$, то заявка приймається на обслуговування і для цього виділяється ресурс в обсязі c_r біт/с. Якщо зазначеної величини ресурсу немає, але виконується нерівність $i_r c_r + i_{nr} c_1 + c_r \leq C$, то швидкість передачі всіх файлів, що знаходяться на обслуговуванні, зменшується з величини $\frac{C - i_r c_r}{i_{nr}}$ до значення

$\frac{C - (i_r + 1)c_r}{i_{nr}}$. Оскільки справедливо співвідношення $i_r c_r + i_{nr} c_1 + c_r \leq C$, то нове значення швидкості передачі файлу буде не менше c_1 , тобто задовольняє прийнятту угоду про передачу файлів оскільки виконується нерівність: $\frac{C - (i_r + 1)c_r}{i_{nr}} \geq c_1$. Якщо виконується нерівність $i_r c_r + i_{nr} c_1 > C$, то надійшла заявка на передачу не критичних даних отримує відмову, оскільки в даній ситуації або немає вільного ресурсу в обсязі c_1 біт / с, або не можна отримати зазначену величину ресурсу зменшивши швидкість передачі i_{nr} файлів, що знаходяться на обслуговуванні, тому що вказану дію зменшить швидкість передачі всіх файлів, включаючи того, що надійшов, до значення меншого ніж c_1 . Таким чином, при зміні швидкості передачі в тій же пропорції змінюється середнє значення залишкового часу обслуговування заявки на передачу файлу. Швидкості передачі даних змінюються динамічно відповідно до завантаження комірки. При малому завантаженні фрагмента мережі LTE дані передаються з максимально можливою швидкістю c_2 , яка підтримується технічними можливостями системи LTE, при великому завантаженні мережі - зі швидкістю c_1 . Відзначимо, що при цьому використовується ресурс, а, отже, і швидкість передачі трафіку сервісів реального часу не змінюються.

Як приклад розподілу ресурсу передачі інформації розглянуто процес надходження і обслуговування заявок в ситуації, коли загальна швидкість дорівнює $C = 100$ Мбіт/с, швидкість обслуговування трафіку реального часу становить $c_r = 10$ Мбіт/с, швидкості передачі трафіку нереального часу $c_1 = 10$ Мбіт/с, $c_2 = 20$ Мбіт/с і комірka знаходиться в стані (2,2). Таким чином, в даний момент часу t_0 зайнято $c_{r,nr} = 2 \cdot 10 + 2 \cdot 20 = 60$ Мбіт/с. Припустимо, в момент t_1 надходить ще одна заявка на передачу трафіку реального часу. Вона приймається до обслуговування і система переходить в стан (3,2). У цьому

стані $c_{r,nr} = 3 \cdot 10 + 2 \cdot 20 = 70$ Мбіт / с. Потім, в момент часу t_2 надходить заявка на передачу ще одного файлу. Вона приймається до обслуговування з максимальною швидкістю $c_2 = 20$ Мбіт / с і система переходить в стан (3,3). У цьому стані загальна швидкість складе $c_{r,nr} = 3 \cdot 10 + 3 \cdot 20 = 90$ Мбіт/с. Якщо тепер в момент t_3 надходить ще одна заявка на передачу файлу, вона буде прийнята до обслуговування. Система перейде в стан (3,4). При цьому швидкість передачі всіх прийнятих раніше файлів, включаючи інформацію, що надійшла заявка, визначиться як: $\frac{100 - 30}{4} = 17,5$ Мбіт / с.

Якщо тепер в момент t_4 надійде заявка на передачу трафіку реального часу, вона буде прийнята до обслуговування. Система переходить в стан (4,4). При цьому швидкість передачі всіх файлів, що передаються даних зменшиться до величини $\frac{100 - 40}{4} = 15$ Мбіт/с. В наступний момент t_5 надходить заявка на передачу трафіку реального часу, відповідно заявка також візьметься до обслуговування і система перейде в стан (5,4). При цьому швидкість передачі всіх файлів, що передаються зменшиться до $\frac{100 - 50}{4} = 12,5$ Мбіт/с. Поступила в момент t_6 заявка на передачу трафіку нереального часу, яка також приймається на обслуговування. Система переходить в стан (5,5). При цьому швидкість передачі трафіку нереального часу, визначається як: $\frac{100 - 50}{5} = 10$ Мбіт/с. Тобто дані почнуть передаватися з мінімально можливою швидкістю $c_1 = 10$ Мбіт/с. Якщо в системі не відбудеться закінчення обслуговування будь-якої заявки, то наступна вхідна заявка будь-якого типу отримає відмову в обслуговуванні. Викладена в прикладі процедура розподілу ресурсу показана на рис. 2.23.

Таким чином система продовжить давати відмови новим заявками, поки не закінчиться передача хоча б однієї заявки будь-якого типу.

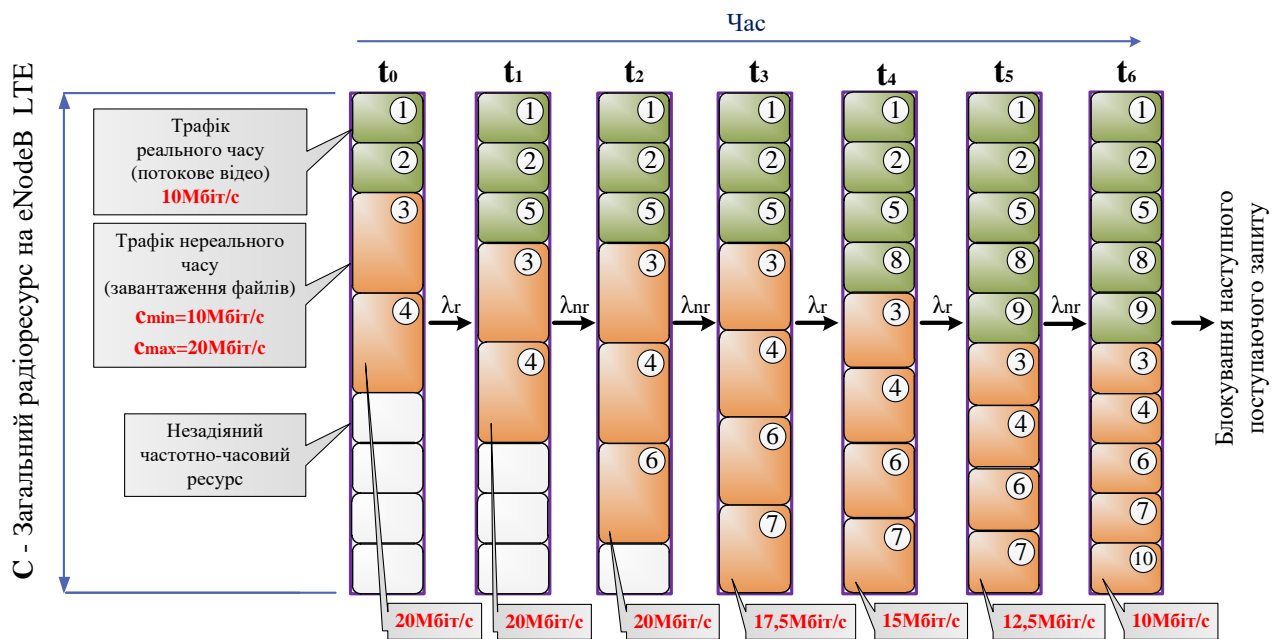


Рис. 2.23. Приклад розподілу ресурсу для досліджуваної моделі мережі стандарту LTE [93,94]

2.5.2. Метод оптимального розподілу частотно-часових ресурсів за критерієм максимально допустимого часу передавання даних із сталим обсягом інформації на основі коефіцієнта заповненості послідовності кадрів

Як відомо, для забезпечення необхідної пропускної здатності пристрою, частотно-часові ресурси базової станції необхідно виділяти в кожному кадрі на протязі всього сеансу зв'язку. Однак, досить часто виділення ресурсів в кожному кадрі стає причиною відмов в обслуговуванні для нових вхідних заявок. У зв'язку з цим, пропонується метод виділення частотно-часових ресурсів на основі коефіцієнта заповненості послідовності кадрів (рис. 2.24). Суть цього методу полягає в тому, що для гарантування необхідної пропускної здатності не обов'язково виділяти ресурс базової станції в кожному наступному кадрі фіксованим об'ємом.

Враховуючи те, що трафік генерований пристроями на території обслуговування базової станції володіє самоподібністю у часі, планувальник ресурсів на контролері eNodeB може динамічно змінювати об'єм виділених ресурсів для конкретного пристрою в різних послідовних кадрах. Головна умова

такого планування, полягає в тому, що загальна кількість виділених ресурсів на протязі секунди має залишатися сталим значенням.

Складність реалізації такого принципу залежить від вимог до якості обслуговування, а також типу трафіку (реального, нереального). Вищезгадана умова розподілу ресурсів більшою мірою стосується трафіку реального часу, для якого вчасне виділення частотно-часового ресурсу є більш потрібним, а ніж для трафіку нереального часу. Це можна пояснити тим, що для трафіку реального часу проміжок тривалості передавання, необхідний для доставки даних до місця призначення, є значно меншим, ніж для трафіку нереального часу.

На рис. 2.24 при $K=1$ необхідні ресурси будуть виділятися в кожному наступному кадрі при активній сесії, а час очікування моменту початку надання послуги рівний нулю. При $K=2$ об'єм виділених ресурсів зросте вдвічі, однак вдвічі зменшиться частота виділення (тобто ресурси будуть резервуватися планувальником для цього пристрою один раз на два кадри). Час очікування моменту початку надання послуги буде рівний нулю, якщо потрібний об'єм ресурсів контролер зарезервує в першому кадрі і буде рівний максимальному значенню (t_{n1} мс) для першої «порції» ресурсів. При виділенні в першій «порції» ресурсів в другому кадрі ($t_{n2} = 20$ мс). При наступних значеннях коефіцієнта K виділення «порцій» ресурсів буде відбуватися аналогічно з врахуванням очевидних змін, які залежать знову ж таки від значення цього коефіцієнта.

Розміщення даних, розрахованих на один кадр, а також міжкадровий інтервал часу (t_n) впливатиме на час очікування моменту початку надання послуги, а також на значення міжпакетного інтервалу, що є суттєвим показником якості обслуговування трафіку реального часу.

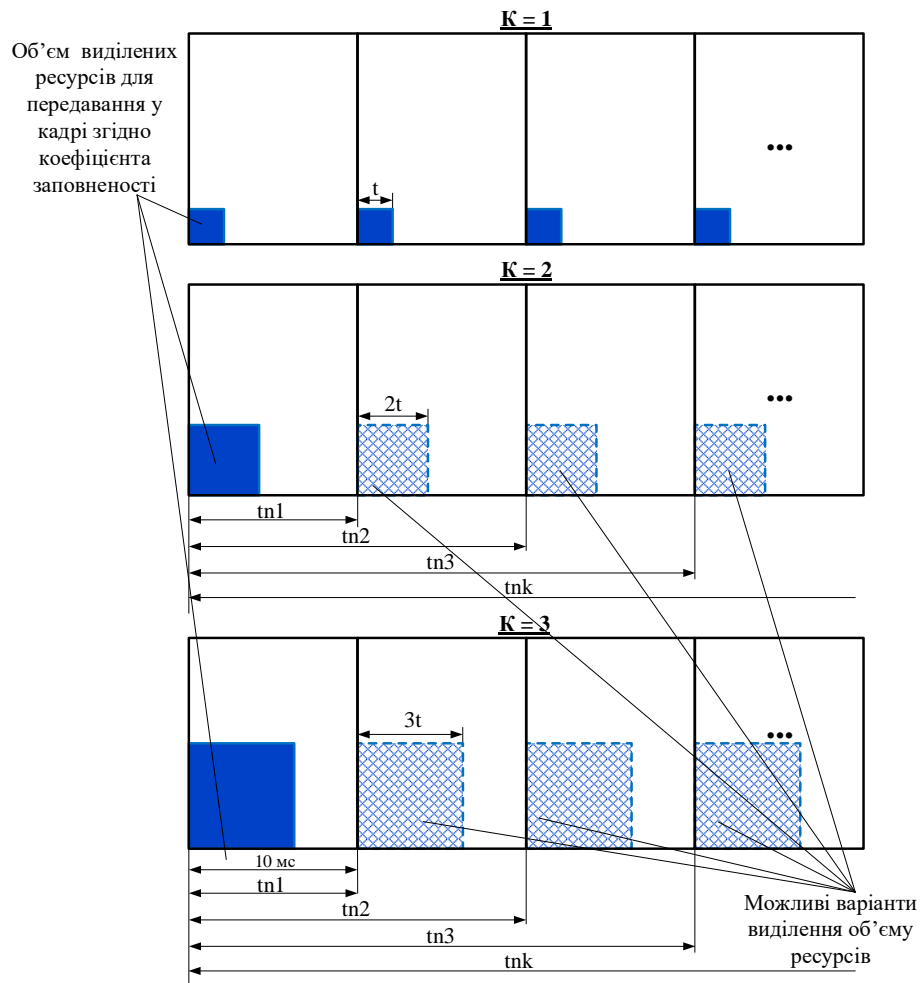


Рис. 2.24. Принцип роботи методу планування частотно-часових ресурсів на основі коефіцієнта заповненості послідовності кадрів

Беручи до уваги той факт, що практично нереально спрогнозувати правильний розподіл об'ємів ресурсів у кожному кадрі при поступленні заявок від пристроїв, що вимагають різні потреби до пропускнуої здатності разом із врахуванням і інших параметрів якості обслуговування. Тому даний метод розподілу частотно-часових ресурсів на основі коефіцієнта заповненості послідовності кадрів доцільно застосовувати не для потокового трафіку реального часу, а до даних із наперед відомим обсягом інформації, яку необхідно передавати (наприклад фото, фрагмент відео, текстові чи вимірні числові дані) нереального часу. При цьому, на передавальній та на приймальній сторонах планувальник на контролері базової станції повинен вести підрахунок кількості переданого об'єму даних і, враховуючи це, визначати (прогнозувати)

об'єм ресурсів, що буде виділено поточному користувачькому пристрою або M2M датчику в наступних кадрах з врахуванням вимог до якості обслуговування, зокрема максимально допустимого часу передавання даних при якому не втратиться актуальність повідомлення.

На початках своєї роботи планувальник на контролері базової станції можливо буде не оптимально виділяти об'єм ресурсів для пристроїв (датчиків), що буде відображатися на кількості відмов. Однак чим більше часу працюватиме контролер, тим раціональніше він виділятиме ресурси. Контролер буде поводити себе як елемент архітектури нейронної мережі. Для правильної його роботи потрібно деякий час, за який він назбирає статистичні дані середнього обсягу передавання даних, на основі яких буде оптимально виділяти частотно-часові ресурси в майбутньому. І чим більший проміжок часу він працюватиме, тим кількість відмов в обслуговуванні прямуватиме до нуля, а ефективність використання ресурсів зростатиме.

Для прикладу розглянемо дані, що генеруються M2M пристроєм та передаються на шлюз. Кількість інформації, яку передає датчик залежить від його призначення. Відповідно, корисна інформація може варіюватись від V_1 до V_i , де V_i – кількість біт для i -го M2M пристрою. Для того, щоб передати інформацію об'єму V_i необхідно виділити $K_{PRB(i)}$. Таким чином, кількість фізичних ресурсних блоків можна розрахувати за формулою:

$$N_{PRB(i)} = \frac{V_i}{V_{PRB}}, \quad (2.16)$$

де V_i – кількість інформації, яку треба передати; V_{PRB} – кількість інформації, яку можна передати 1 фізичним ресурсним блоком.

Далі, припустимо, що в певні моменти часу є не ефективне використання субкадру, таким чином планування ресурсів відбуватиметься таким чином, щоб заповняти до максимум невикористаних ресурсів, що призводить до того повідомлення в різні моменти часу передаються різними порціями обсягу даних з різним часовим розділенням.

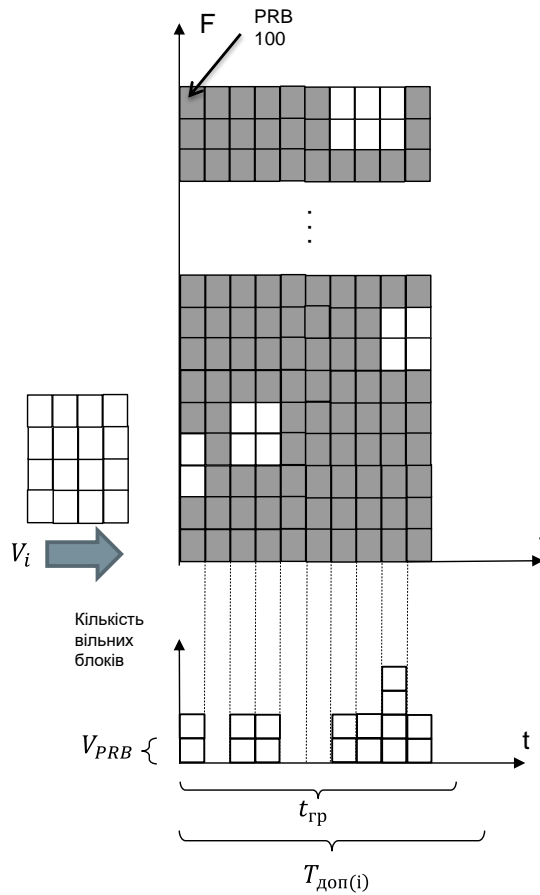


Рис. 2.25. Принцип оптимального розподілу частотно-часових ресурсів за критерієм максимально допустимого часу передавання даних із сталим обсягом інформації на основі коефіцієнта заповненості послідовності кадрів [95]

Припустимо, що певний тип даних M2M чи мобільного пристрою має максимально можливий час доставки даних $T_{доп(i)}$. Відповідно, виходячи з часової діаграми вільності ресурсів необхідно забезпечити умову гарантованої доставки даних:

$$t_i \leq T_{доп(i)}. \quad (2.17)$$

Виходячи з постановленої умови, необхідно забезпечити кожному пристрою кількість необхідних вільних ресурсних блоків в межах цього проміжку. При такому плануванні ресурсів необхідно врахувати, що частина повідомлення V_{i3} , яка не була передана протягом допустимого часу $T_{доп(i)}$, робить все повідомлення неактуальним. Тому постає завдання вимушеного

виділення необхідних ресурсів для передачі залишкового повідомлення V_{iz} при настанні максимально допустимого часу доставки повідомлення $T_{don(i)}$.

$$t_i \leq t_{zp} \leq T_{don(i)}, \quad (2.18)$$

де $t_{гр}$ граничне значення часу, що становить $T_{don(i)} \cdot 0.95$

2.6. Висновок до розділу 2

У другому розділі запропоновано поділяти мережу зі щільним розташуванням M2M пристроїв на сегменти, які в свою чергу складатимуться із кластерів, в кожному із яких визначатиметься головний вузол. Також, для забезпечення E2E QoS та економії рівня батареї M2M пристроїв, пропонується вдосконалити архітектуру мережі LTE шляхом введення шлюза, який по LTE каналу відсилатиме та прийматиме дані M2M пристроїв до/від eNodeB, надіслані головними вузлами по каналу Wi-Fi. До функцій шлюза можна віднести: агрегацію даних, їх пріоритезацію та в разі потреби балансування навантаження як між комірками так і між шлюзами. Запропоновано 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, метод оптимального вибору ширини каналу та кількості субкадрів для забезпечення необхідної пропускної здатності та підвищення ефективності використання ресурсів. 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.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ ЧАСТОТНО-ЧАСОВИХ РЕСУРСІВ В ГЕТЕРОГЕННІЙ МЕРЕЖІ 4G/5G

3.1. Аналітичне моделювання та дослідження процесу оптимізації розподілу ресурсів при формуванні кадрів на каналному рівні LTE

Для аналітичного дослідження ефективності використання розробленого методу оптимального розподілу ресурсів використаємо математичні вирази запропоновані у підрозділі 2.5, для цього припустимо, що оператор має в своєму розпорядженні два канали: один шириною 1,4 МГц, а інший – 3 МГц. Прийmemo, що в початковий момент аналітичного дослідження кадри двох каналів не передають ніякого навантаження від користувачів та M2M пристроїв. В моменти, що кратні тривалості одного кадру (10 мс), надходять нові запити на обслуговування.

Розглянемо поетапне заповнення субкадрів кожного з доступних каналів. Для дослідження прийmemo, що всі мобільні пристрої та M2M датчики можуть передавати та приймати дані з використанням двох антен. Згідно методики, що наведена у підрозділі 2.5, розрахуємо кількість корисних субкадрів, які треба забезпечити пристрою (датчику) для гарантованого його обслуговування. Враховуючи те, що в один субкадр можна помістити дані тільки одного пристрою, фіксуємо значення кількості зарезервованих субкадрів.

Припустимо, що на етапі 1 (перші 10 мс) поступає заявка на обслуговування від мобільного пристрою, який має порядковий номер, що рівний 1. Пристрій спілкується з базовою станцією по сигналізаційних каналах і надсилає йому значення параметра відношення сигнал/шум. На основі цього параметра, базова станція визначає величину індикатора якості каналу, за яким закріплена модуляційно-кодова схема, на основі якої можна визначити максимальне значення пропускної здатності, що може бути виділена цьому пристрою. Після цього планувальник ресурсів на контролері базової станції

обчислює кількість субкадрів, корисну інформацію, яку треба передавати у кожному кадрі протягом секунди, щоб забезпечити необхідну пропускну здатність. Перший етап заповнення кадру показано на рис. 3.1.

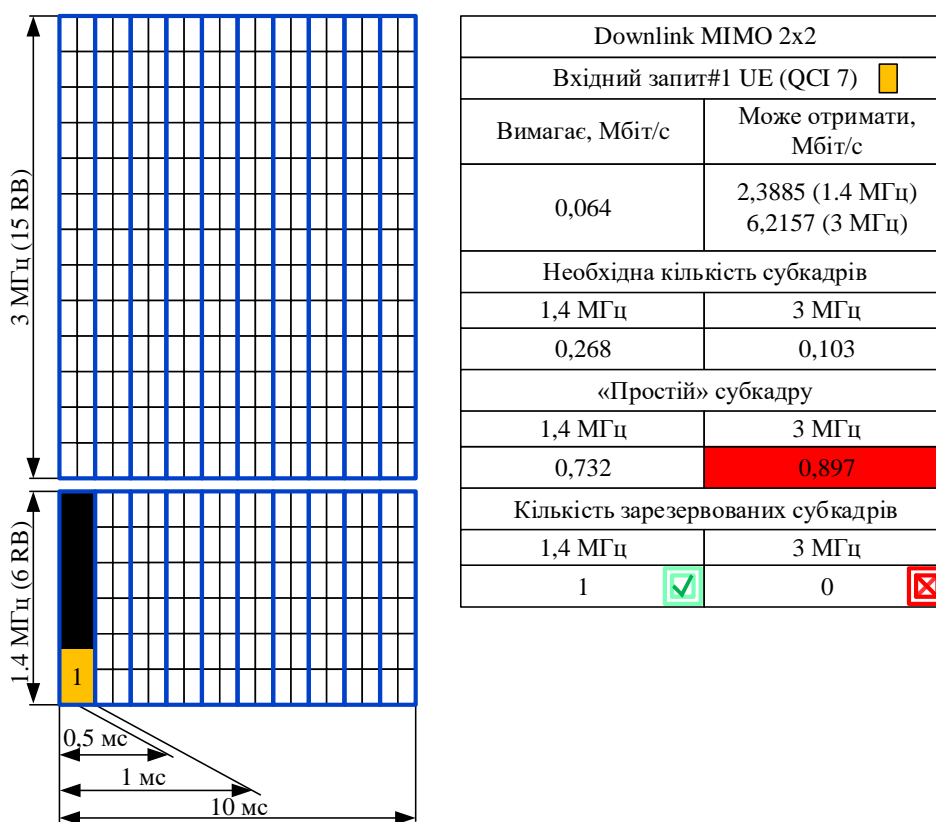


Рис. 3.1. Перший етап повного заповнення кадру

Як бачимо, простій субкадру менший за ширини каналу 1,4 МГц, тому резервуємо необхідну кількість субкадрів саме у цій ширині каналу.

Отже, для абонента з порядковим номером 1 потрібно зарезервувати один субкадр у каналі 1,4 МГц. При цьому зарезервованний субкадр передаватиме корисну інформацію тільки у 26,8% своєї повної місткості (жовтий колір) при відповідному значенні індикатора якості каналу (CQI7), решту – 73,2% буде «простоювати» (чорний колір) і згідно стандарту LTE не може бути використана іншим пристроєм.

Перший пристрій почне передавати дані. В наступні 10 мс постає нова заявка на обслуговування, контролер робить для неї аналогічні обчислення. Результат показано на рис. 3.2.

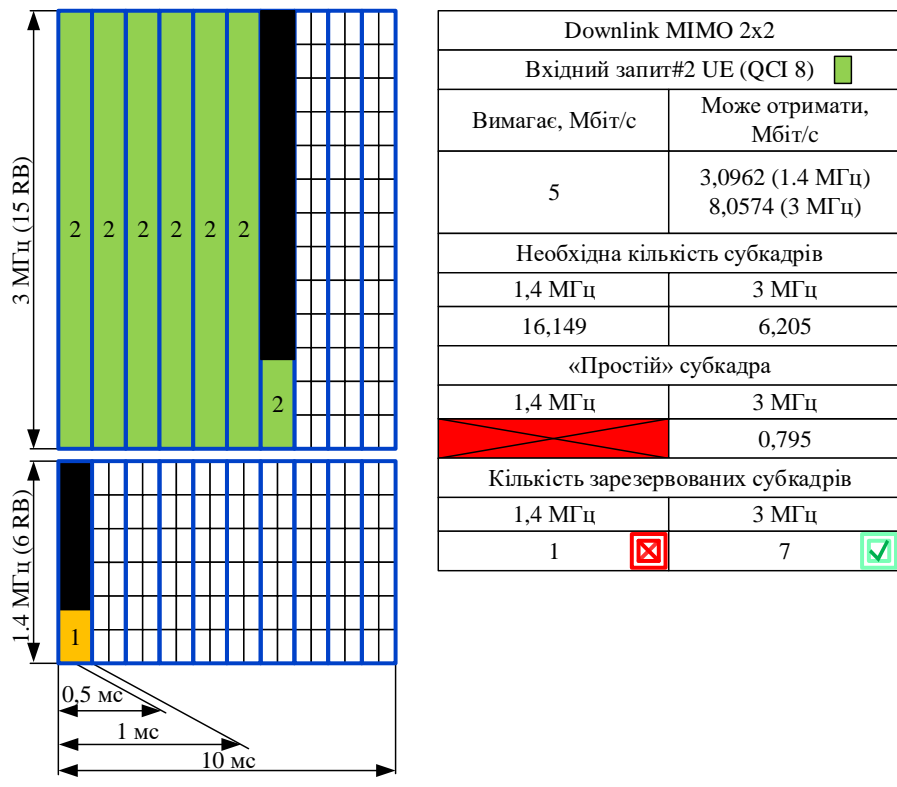
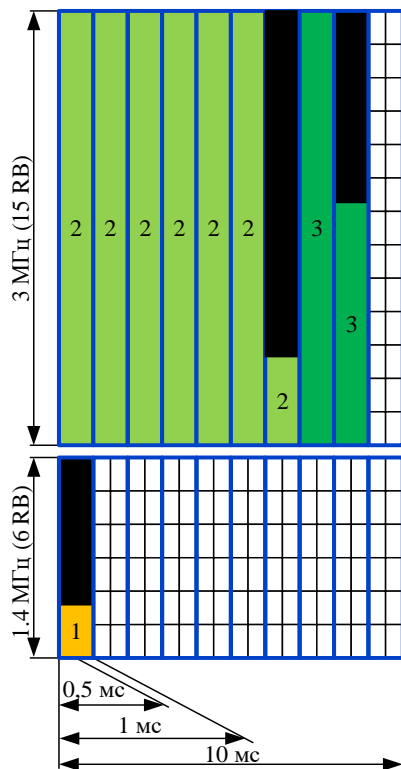


Рис. 3.2. Другий етап повного заповнення кадру

Як бачимо, вимоги до пропускної здатності, такі, що не можуть бути забезпечені. Вимоги не можуть бути забезпечені в ширині каналу 1,4 МГц, через те, що необхідна кількість субкадрів 17. У зв'язку з тим, що максимальна кількість субкадрів в межах кадру рівна 10, тому вхідна заявка не може бути обслуженою в смузі 1,4 МГц. Ресурси потрібні цьому користувачському пристрою контролер виділить в смузі 3 МГц, зафіксує значення кількості зарезервованих субкадрів в обох доступних смугах і буде враховувати це значення при виділенні субкадрів для обслуговування заявок наступних пристроїв.

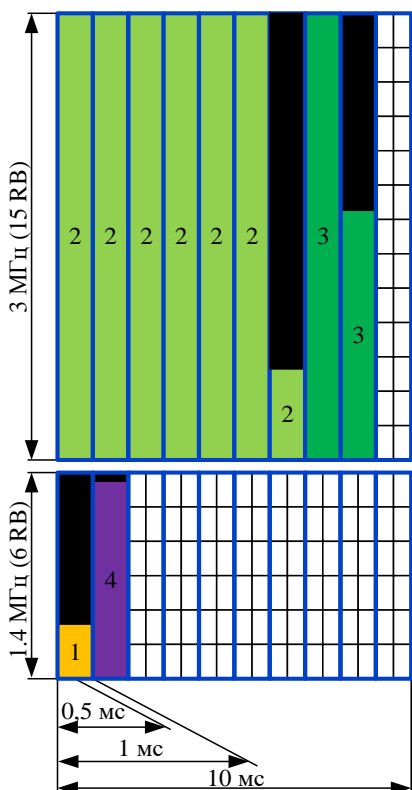
В наступний момент часу (наступні 10 мс) поступає нова заявка на обслуговування від M2M датчика. Згідно класичної архітектури виділення ресурсів для нього відбувається аналогічно як і для мобільного пристрою. Результат виділення резервування субкадрів показано на рис.3.3.



Downlink MIMO 2x2	
Вхідний запит#3 M2M (QCI 1) ■	
Вимагає, Мбіт/с	Може отримати, Мбіт/с
0.1	0,2464 (1.4 МГц) 0,6413 (3 МГц)
Необхідна кількість субкадрів	
1,4 МГц	3 МГц
4,058	1.559
«Простий» субкадру	
1,4 МГц	3 МГц
0,942	0,441
Кількість зарезервованих субкадрів	
1,4 МГц	3 МГц
1 ☒	9 ☑

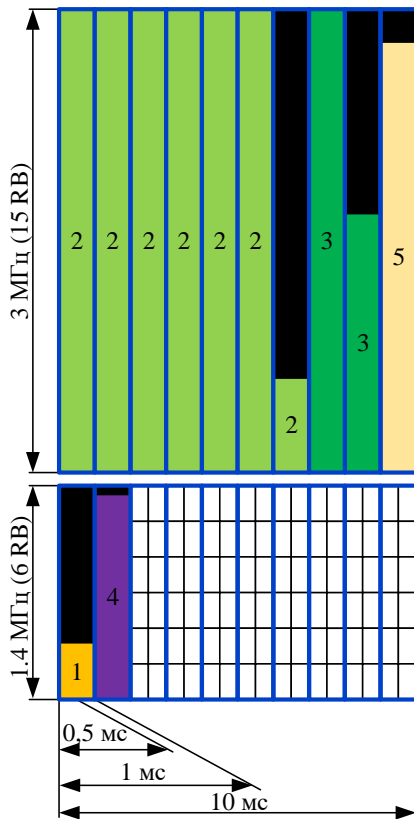
Рис. 3.3. Третій етап повного заповнення кадру

Наступні етапи заповнення кадру згідно класичної архітектури LTE аналогічні до попередньо описаних і показані на рис.3.4 – 3.6.



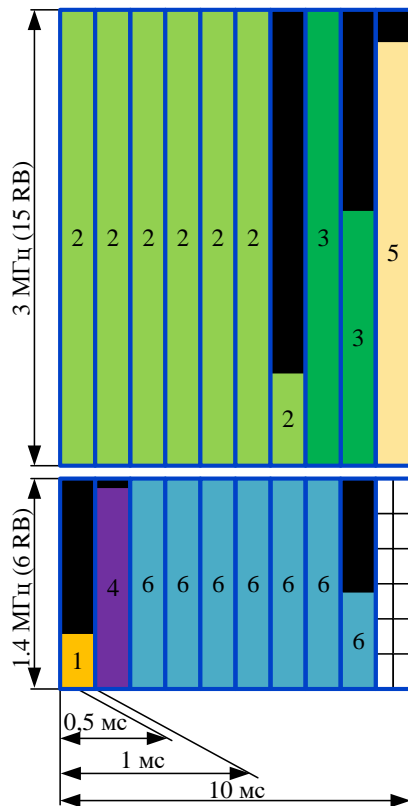
Downlink MIMO 2x2	
Вхідний запит#4 M2M (QCI 13) ■	
Вимагає, Мбіт/с	Може отримати, Мбіт/с
0.7	7,3171 (1.4 МГц) 19,0419 (3 МГц)
Необхідна кількість субкадрів	
1,4 МГц	3 МГц
0,957	0,368
«Простий» субкадру	
1,4 МГц	3 МГц
0,043	0,632
Кількість зарезервованих субкадрів	
1,4 МГц	3 МГц
2 ☑	9 ☒

Рис. 3.4. Четвертий етап повного заповнення кадру



Downlink MIMO 2x2	
Вхідний запит #5 M2M (QCI 14) ■	
Вимагає, Мбіт/с	Може отримати, Мбіт/с
2	8,2744 (1.4 МГц) 21,5331 (3 МГц)
Необхідна кількість субкадрів	
1,4 МГц	3 МГц
2,417	0,929
«Простий» субкадру	
1,4 МГц	3 МГц
0,583	0,071
Кількість зарезервованих субкадрів	
1,4 МГц	3 МГц
2 ☒	10 ☑

Рис. 3.5. П'ятий етап повного заповнення кадру



Downlink MIMO 2x2	
Вхідний запит #6 UE (QCI 8) ■	
Вимагає, Мбіт/с	Може отримати, Мбіт/с
2	3,0962 (1.4 МГц) 8,0574 (3 МГц)
Необхідна кількість субкадрів	
1,4 МГц	3 МГц
6,46	2,482
«Простий» субкадру	
1,4 МГц	3 МГц
0,54	0,518
Кількість зарезервованих субкадрів	
1,4 МГц	3 МГц
9 ☑	10 ☒

Рис. 3.6. Шостий етап повного заповнення кадру

На шостому етапі повного заповнення кадрів каналів 1,4 МГц та 3 МГц бачимо, що кадр ширшого каналу повністю заповнений, а кадр каналу 1,4 МГц має ще один вільний субкадр. Тобто він може бути зарезервований одним користувачьким пристроєм або одним M2M датчиком. Причому вимога по пропускній здатності будь-якого з них мають бути такою, що може бути перенесеною одним субкадром.

Тепер розглянемо особливості обслуговування трафіку класичною архітектурою доповненою мультисервісним шлюзом. Для порівняння візьмемо ті ж вхідні заявки на обслуговування, які розміщували в кадрах при виділенні ресурсів згідно звичайної класичної архітектури. Згідно принципу роботи мультисервісного шлюза він агрегуватиме дані від головних вузлів, які були зібрані ними з дочірніх. Проміжні результати заповнення кадрів для широт каналів 1,4 та 3 МГц не будуть відображені. Оскільки за принципом заповнення аналогічні до вищеописаних, за винятком того, що для доповненої архітектури всі дані від M2M датчиків передаватимуться до базової станції через мультисервісний шлюз, який зі сторони базової станції розглядається як один пристрій, що містить дані від 3 M2M датчиків.

Комплексна вхідна заявка на обслуговування від мультисервісного шлюза вказує на те, що для задоволення трьох M2M датчиків по частотно-часових ресурсах потрібно забезпечити 2,8 Мбіт/с.

Контролер базової станції робить відповідні обчислення і виділяє субкадри в тій ширині каналу, де простій субкадру буде мінімальним та із врахуванням вільності кількості затребуваних субкадрів. Для задоволення заявки від мультисервісного шлюза йому були виділені ресурси в каналі 3 МГц. Потрібні ресурси займали 3 субкадри, два із яких заповнені повністю, а останній – на 76,4 %. Кінцевий результат заповнення кадру при обслуговуванні мобільних абонентів та M2M датчиків зображено на рис. 3.7. мультисервісний шлюз розміщено на такій віддалі від базової станції, на якій значення індикатора якості каналу рівне 8.

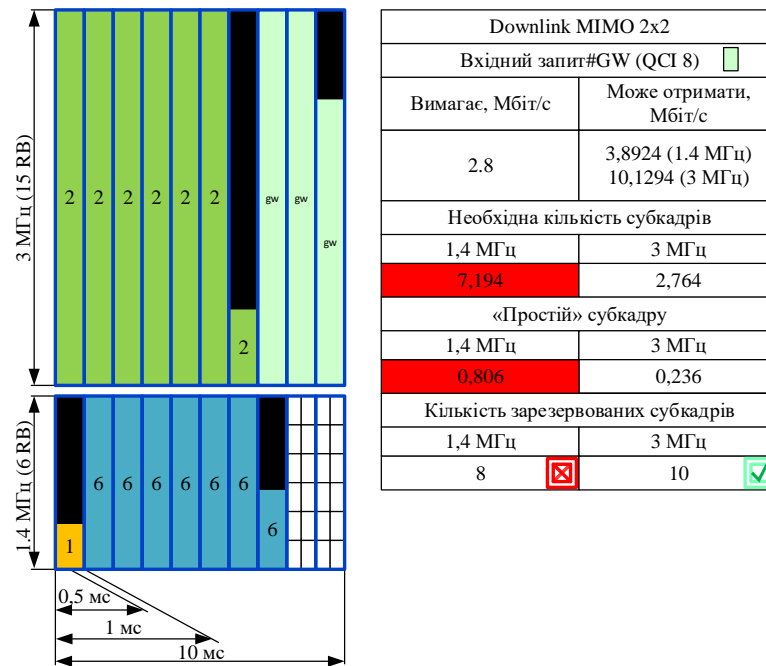


Рис. 3.7. Кінцевий варіант заповнення кадрів каналів 1,4 та 3 МГц для випадку обслуговування трафіку класичною архітектурою доповненою мультистандартним шлюзом

Порівнюючи рис.3.6 та 3.7, можна зробити висновок про те, що при обслуговуванні трафіку без використання мультистандартного шлюза кількість незарезервованих субкадрів рівна 1 в смузі 1,4 МГц, а при використанні мультистандартного шлюза вдалось зекономити один субкадр за рахунок кластеризації та групування даних M2M пристроїв.

Приведене аналітичне дослідження показало значення виграшу, яке може бути і більшим, тобто кількість звільнених субкадрів може бути і більшою у випадку поступлення заявок на обслуговування з низькими вимогами до пропускної здатності.

Враховуючи той факт, що кількість пристроїв, що припадає на одну людину зростає і невідомо до якої межі це буде тривати. Тому проведемо ще одне аналітичне дослідження. Припустимо, що на протязі 10 мс до контролера поступає 20 заявок на обслуговування, кожна із яких вимагає забезпечення пропускної здатності 0,1 Мбіт/с. Причому у ресурсній сітці базової станції немає пристроїв, обслуговування яких відбувається в поточний момент.

Без мультистандартного шлюза всі пристрої передаватимуть дані напряму до базової станції. Причому використовуватимуть не весь виділений їм субкадр. Велика частина субкадру буде «простоювати» (див рис.3.8).

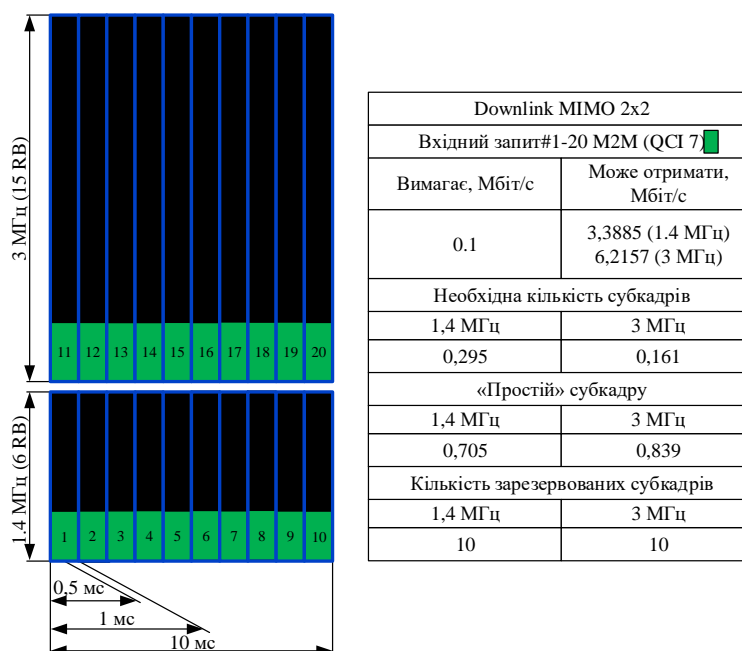
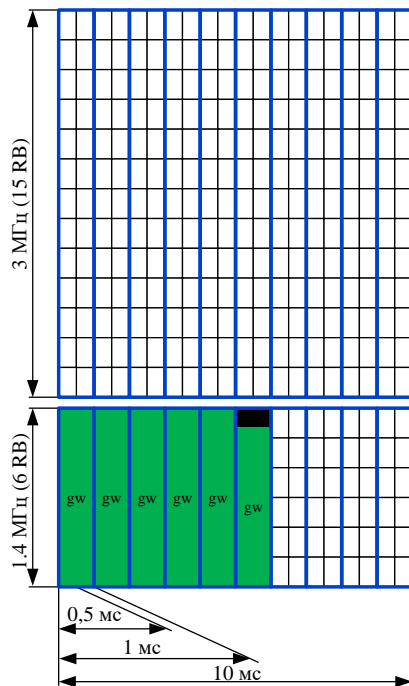


Рис. 3.8. Обслуговування M2M трафіку без мультисервісного шлюза

Як бачимо із рис. 3.8 всі субкадри зайняті в обох каналах. Нові вхідні заявки будуть відкидатися, у зв'язку із зайнятістю всіх субкадрів.

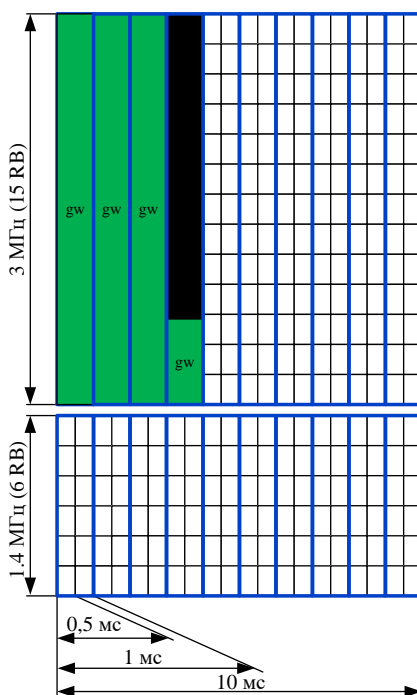
При доповненні мультистандартним шлюзом класичну архітектуру LTE можливі два випадки виділення необхідних ресурсів для задоволення потреби у передаванні даних від шлюза до базової станції: виділення ресурсів по принципу меншого значення «простою» субкадру (рис. 3.9) або за принципом більшої кількості вивільнення субкадрів (рис. 3.10).

Надання переваги використання одному з принципів, що наведено на рис. 3.9 та 3.10 залежить від середньостатистичного значення об'єму трафіку, що припадає на один пристрій, а також від години найбільшого навантаження та проміжку часу, протягом якого навантаження на базову станцію є високим.



Downlink MIMO 2x2	
Вхідний запит #GW M2M (QCI 7) ■	
Вимагає, Мбіт/с	Може отримати, Мбіт/с
2	3,3885 (1.4 МГц) 6,2157 (3 МГц)
Необхідна кількість субкадрів	
1,4 МГц	3 МГц
5,902	3,218
«Простий» субкадру	
1,4 МГц	3 МГц
0,098	0,782
Кількість зарезервованих субкадрів	
1,4 МГц	3 МГц
6	0

Рис. 3.9. Забезпечення необхідної пропускної здатності для трафіку згідно вхідної заявки мультистандартного шлюза (20 датчиків) за принципом меншого «простого» субкадру



Downlink MIMO 2x2	
Вхідний запит #GW M2M (QCI 7) ■	
Вимагає, Мбіт/с	Може отримати, Мбіт/с
2	3,3885 (1.4 МГц) 6,2157 (3 МГц)
Необхідна кількість субкадрів	
1,4 МГц	3 МГц
5,902	3,218
«Простий» субкадру	
1,4 МГц	3 МГц
0,098	0,782
Кількість зарезервованих субкадрів	
1,4 МГц	3 МГц
0	4

Рис. 3.10. Забезпечення необхідної пропускної здатності для трафіку згідно вхідної заявки мультистандартного шлюза (20 датчиків) за принципом більшої кількості вивільнення субкадрів

Проаналізувавши рис. 3.9 та 3.10, бачимо що кількість вивільнених субкадрів для випадку резервування за принципом меншого «простою» у смузі 3 МГц рівна 10, а в смузі 1,4 МГц – 4, а для резервування за принципом більшої кількості вивільнення субкадрів: кількість вільних субкадрів у смузі 3 МГц – 6, а в смузі 1,4 МГц – 10.

Загалом можна сказати, що розташування мультистандартного шлюза має бути таким, щоб мати можливість отримувати більший об'єм частотно-часових ресурсів при збільшенні кількості пристроїв (датчиків), що передають дані через нього.

Щоб забезпечити умову оптимального розташування мультистандартного шлюза, контролер базової станції повинен збирати статистичну інформацію про загальний обсяг переданих даних з окремих сегментів мережі та середній обсяг інформації переданої одним пристроєм (датчиком). Після цього видавати інформацію інженерам мережі про оптимальне розміщення мультисервісного шлюза.

Для визначення оптимальної віддалі від базової станції до мультистандартного шлюза повинен бути врахований і стан радіоканалу, який впливатиме на значення індикатора якості каналу, за яким жорстко закріплена рекомендована модуляційно-кодова схема.

Контролер базової станції для оптимального розташування мультистандартного шлюза повинен мати табличні значення пропускних здатностей для різної кількості антен на передачу та прийом з врахуванням стану каналу.

У таблицях 3.1, 3.2 та 3.3 наведено ці значення для кількості антен, що рівна одній, дві та чотири відповідно для різних каналів при нормальному циклічному префіксі. Приведені табличні значення дозволять раціонально виділяти частотно-часові ресурси, в умовах їх обмеженості.

Таблиця 3.1

Можливі пропускні здатності шлюза, одна антена на передачу та прийом

CQI	Ширина каналу, МГц							
	0,2	1,4	3	5	10	15	20	100
	Корисна швидкість, Мбіт/с							
1	0,0094	0,1285	0,3342	0,5627	1,134	1,7053	2,2766	11,3828
2	0,0144	0,1977	0,5141	0,8657	1,7446	2,6235	3,5024	17,512
3	0,0232	0,318	0,8269	1,3923	2,8059	4,2195	5,633	28,1652
4	0,0371	0,5075	1,3196	2,2219	4,4778	6,7337	8,9895	44,9475
5	0,054	0,7398	1,9237	3,2391	6,5277	9,8163	13,1048	65,5242
6	0,0724	0,9919	2,5792	4,3429	8,752	13,1612	17,5704	87,852
7	0,091	1,2456	3,239	5,4538	10,9909	16,528	22,0652	110,3258
8	0,1179	1,6147	4,1987	7,0698	14,2475	21,4252	28,603	143,0149
9	0,1482	2,0299	5,2784	8,8877	17,9112	26,9346	35,958	179,7902
10	0,1682	2,3034	5,9896	10,0853	20,3245	30,5638	40,803	204,0152
11	0,2047	2,8027	7,2877	12,2711	24,7296	37,1881	49,6466	248,233
12	0,2404	3,292	8,5602	14,4137	29,0475	43,6813	58,3151	291,5753
13	0,2786	3,816	9,9226	16,7078	33,6707	50,6336	67,5964	337,9822
14	0,3151	4,3152	11,2208	18,8936	38,0758	57,2579	76,44	382,2001
15	0,3422	4,6859	12,1848	20,5168	41,3469	62,177	83,007	415,0351

Таблиця 3.2

Можливі пропускні здатності шлюза, дві антени на передачу та прийом

CQI	Ширина каналу, МГц							
	0,2	1,4	3	5	10	15	20	100
	Корисна швидкість, Мбіт/с							
1	0,022	0,246	0,6413	1,0801	2,1769	3,2738	4,3707	21,853
2	0,034	0,379	0,9866	1,6616	3,3491	5,0366	6,7241	33,620
3	0,056	0,609	1,5868	2,6724	5,3865	8,1006	10,8146	54,073
4	0,089	0,973	2,5323	4,2648	8,5961	12,9273	17,2586	86,292
5	0,130	1,418	3,6916	6,2172	12,531	18,8454	25,1594	125,79
6	0,174	1,901	4,9496	8,3358	16,801	25,2671	33,7327	168,66
7	0,219	2,388	6,2157	10,468	21,099	31,7307	42,362	211,80
8	0,284	3,096	8,0574	13,569	27,351	41,1324	54,9137	274,56
9	0,357	3,892	10,129	17,059	34,384	51,7094	69,0344	345,17
10	0,405	4,416	11,494	19,357	39,017	58,6767	78,3361	391,68
11	0,493	5,374	13,985	23,553	47,473	71,3942	95,3145	476,57
12	0,579	6,312	16,427	27,666	55,762	83,8598	111,956	559,78
13	0,671	7,317	19,041	32,069	64,638	97,2069	129,775	648,87
14	0,759	8,274	21,533	36,265	73,0947	109,9243	146,754	733,770
15	0,8249	8,9853	23,383	39,3805	79,3743	119,368	159,3618	796,808

Можливі пропускні здатності шлюза, чотири антени на передачу та прийом

CQI	Ширина каналу, МГц							
	0,2	1,4	3	5	10	15	20	100
	Корисна швидкість, Мбіт/с							
1	0,05	0,4651	1,211	2,0397	4,1116	6,1835	8,2553	41,2766
2	0,0769	0,7155	1,863	3,138	6,3255	9,513	12,7005	63,5025
3	0,1236	1,1508	2,9963	5,0469	10,1735	15,3001	20,4266	102,1332
4	0,1973	1,8365	4,7817	8,0542	16,2355	24,4167	32,598	162,9897
5	0,2876	2,6772	6,9707	11,7413	23,6679	35,5945	47,521	237,6052
6	0,3855	3,5894	9,346	15,7423	31,7329	47,7235	63,7142	318,5709
7	0,4842	4,5076	11,7369	19,7694	39,8506	59,9319	80,0131	400,0657
8	0,6276	5,8432	15,2145	25,627	51,6582	77,6895	103,720	518,6037
9	0,789	7,3458	19,1268	32,2168	64,9418	97,6668	130,391	651,959
10	0,8953	8,3356	21,7039	36,5577	73,6921	110,826	147,960	739,8041
11	1,089	10,142	26,408	44,4812	89,664	134,846	180,029	900,1479
12	1,2796	11,913	31,0189	52,2477	105,319	158,391	211,463	1057,316
13	1,4832	13,809	35,9559	60,5634	122,082	183,6	245,119	1225,598
14	1,6773	15,615	40,66	68,4868	138,054	207,621	277,188	1385,942
15	1,8214	16,957	44,1531	74,3706	149,914	225,458	301,001	1505,009

Оптимальний вибір ширини каналу для конкретного мобільного пристрою або M2M (IoT) датчика можна представити загальною схемою, яка показана на рис. 3.11.

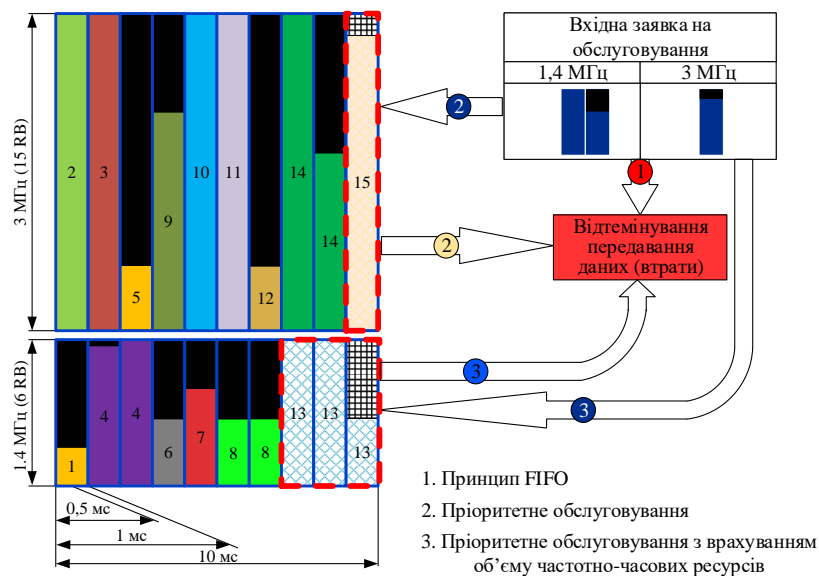


Рис. 3.11. Загальна схема обслуговування мобільних користувачів та M2M/IoT датчиків гетерогенної мобільної мережі 4G/5G [93]

Схема показує послідовність кроків, яку повинен робити контролер базової станції при розгляді вхідних заявок на обслуговування. Контролер повинен здійснити наступні кроки для оптимального резервування необхідних частотно-часових ресурсів:

- 1) аналіз вимог;
- 2) визначення необхідної кількості субкадрів в межах кадру;
- 3) перевірка доступності необхідних субкадрів;
- 4) у разі їх доступності резервувати за одним із принципів (принцип FIFO, пріоритетне обслуговування, пріоритетне обслуговування з врахуванням об'єму частотно-часових ресурсів).

На рис. 3.11 показано, що для випадку, коли кількість вільних субкадрів немає і контролер резервує субкадри по принципу FIFO, тоді пристрій (датчик) буде втрачено (стрілка з підписом «1»). Коли контролер працює по принципу номер 2 (пріоритетне обслуговування), він відтермінує передавання даних для пристрою (датчика), який вже передає дані, сервіс якого має нижчий пріоритет, ніж пріоритет сервісу вказаного у вхідній заявці на обслуговування, і обслужить пристрій (датчик), сервіс якого має вищий пріоритет (стрілка з підписом «2»). Обслуговування пристроїв (датчиків) згідно третього принципу притаманне для тих випадків, коли, згідно статистичних даних (або у зв'язку з важливою подією, яка з хвилини на хвилину повинна відбутися на території дії базової станції), прогнозується значна кількість вхідних запитів на обслуговування і резервування згідно принципу 2 надає значні втрати. Натомість ці втрати можна зменшити шляхом відтермінування передавання даних для пристрою (датчика), що є менш пріоритетним і займає найбільшу, з-поміж інших пристроїв (датчиків), кількість субкадрів.

3.2. Імітаційне моделювання та дослідження ефективності використання методу оптимального розподілу частотно-часових ресурсів в мережі LTE

Для написання імітаційної моделі проаналізовано роботу програмного забезпечення LTE Downlink Resource Element Visualisation v1.1 (рис. 3.12), яке надає можливість вибрати параметри низхідного каналу і за допомогою цих параметрів визначити корисну пропускну здатність для абонента. Нажаль використання існуючого засобу моделювання LTE Downlink Resource Element Visualisation v1.1 не дає змоги дослідити ефективність запропонованого методу оптимального розподілу ресурсів в умовах динамічного стану користувачів, їх кількості та ін. Для цього у роботі розроблено унікальну адекватну імітаційну модель процесу розподілу радіоресурсів в межах функціонування однієї базової станції LTE.

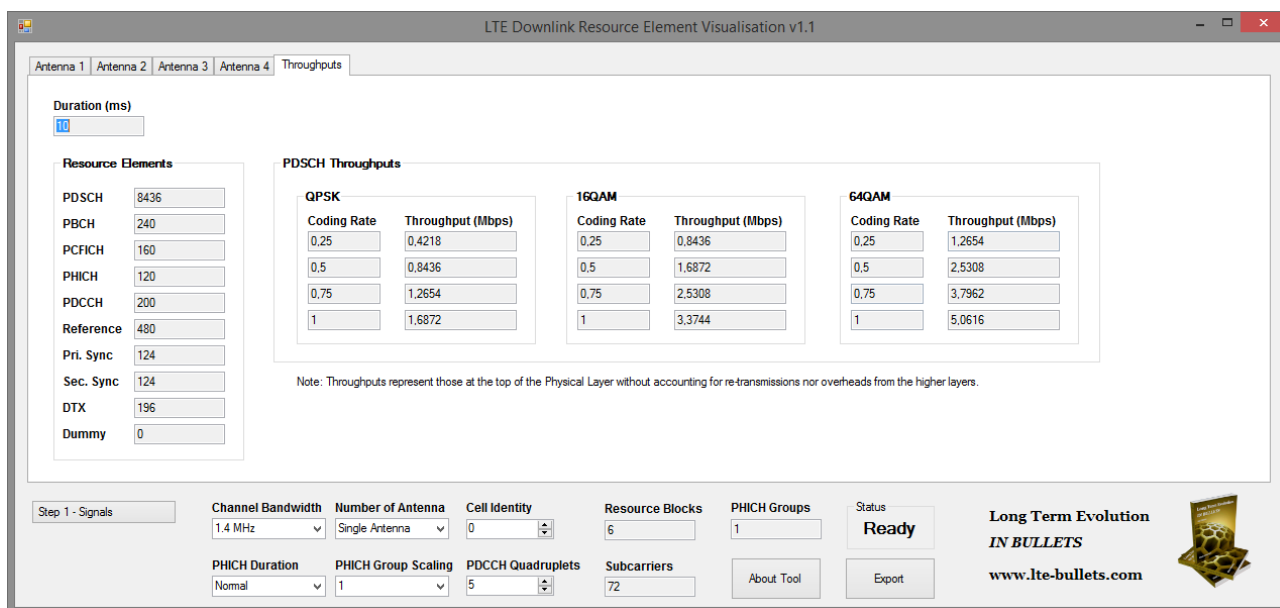


Рис. 3.12. Графічний інтерфейс програмного забезпечення LTE Downlink Resource Element Visualisation v1.1

Нижче у роботі наведено детальне пояснення функціональних можливостей та переваг із відомими симуляторами.

3.2.1. Розроблення та структурно-функціональний опис імітаційної моделі процесу розподілу радіоресурсів в межах функціонування однієї базової станції LTE

Відповідно, для дослідження можливостей обслуговування мобільних користувачів та IoT/M2M датчиків розроблено імітаційну модель, яка враховує особливості підрахунку пропускної здатності для низхідного каналу аналогічно до вищезгаданого програмного забезпечення. Також визначено кількість ресурсних елементів для висхідного каналу зв'язку і аналогічним чином підраховано пропускну здатність, яка буде у цьому випадку. Імітаційна модель показує загасання при поширенні сигналу від користувацького пристрою до базової станції (або у зворотному напрямку). Ці загасання обчислені у відповідності до моделей поширення радіосигналу. Також графічний інтерфейс надає можливість дослідити зміну параметрів QoS для випадку, коли абоненту притаманна мобільність.

Загалом графічний інтерфейс імітаційної моделі містить наступні вкладки:

- Downlink.
- Uplink.
- Path-loss Models.
- Network map (manual control).
- Network map (static moment).
- Parameters simulation.

Розглянемо детальніше складові елементи кожної з вкладок. На вкладці Downlink розташована інформація про низхідний канал зв'язку (канал від базової станції до користувача). Складові елементи цієї вкладки відображено на рис. 3.13. На рис.3.13 вкладку розмічено по областях для кращого розуміння.

Область 1 містить інформацію про ширину каналу (Channel Bandwidth), кількість антен на передачу та прийом (Number of Antenna), тривалість циклічного префіксу (PHICH Duration) і коефіцієнта, що відповідає за кількість виділених ресурсів для каналу PHICH (інформація про необхідність повторної передачі даних, PHICH Group Scaling). Зміна ширини каналу вплине на

кількість ресурсних блоків у субкадрі та кількість піднесучих. Зміна одного з параметрів також впливає на співвідношення між корисними ресурсними елементами та сигналізаційними.

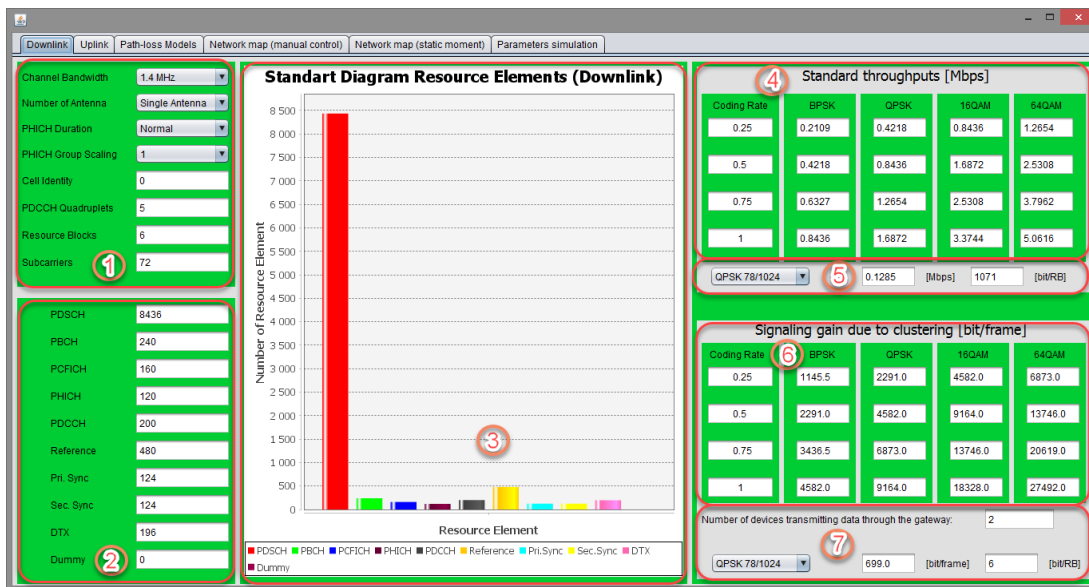


Рис. 3.13. Вкладка низхідного каналу зв'язку

Область 2 відображає інформацію про кількість ресурсних елементів кожного сигналізаційного каналу, а також елементів виділених для даних користувача при вибраних параметрах із області 1.

Область 3 показує графічне відображення кількості ресурсних елементів області 2.

Область 4 показує корисну пропускну здатність, яка підрахована для низхідного каналу зв'язку аналогічно до принципу, згідно якого працює програмне забезпечення LTE Downlink Resource Element Visualisation v1.1.

В LTE Downlink Resource Element Visualisation v1.1 не враховано стандартизовані швидкості коду. В імітаційній моделі це виправлено. Тому область 5 дає можливість вибрати стандартизовану модуляційно-кодову схему, враховуючи яку, разом із кількістю ресурсних елементів виділених для даних абонента (PDSCH), що згенерована у відповідності до вибраних параметрів, що відображені у області 1, можна підрахувати корисну пропускну здатність. Стандартизована корисна пропускну здатність відображена у області 5 для цілого кадру, а також в розрахунку на один ресурсний блок.

Область 6 та 7 надає можливість побачити вивільнення сигналізаційних ресурсів базової станції на користь корисного навантаження для швидкостей коду взятих із програмного забезпечення LTE Downlink Resource Element Visualisation v1.1 та стандартизованих відповідно. Виграш по сигналізаційних даних буде у випадку доповнення класичної архітектури LTE мультистандартним GW шлюзом. Спосіб підрахунку цього виграшу описано у підрозділі 2.3.

Вкладку Uplink реалізовано аналогічно до Downlink, але з врахуванням висхідного напрямку передавання. Загальний вигляд вкладки показано на рис. 3.14. Опис областей вкладки Uplink:

- 1) Параметри висхідного каналу зв'язку.
- 2) Кількість ресурсних елементів, що виділені під сигналізацію та дані користувача (PUSCH).
- 3) Графічне відображення кількості ресурсних елементів, що відображено у області 2.
- 4) Корисна пропускна здатність, знайдена згідно принципу підрахунку за програмним забезпеченням LTE Downlink Resource Element Visualisation v1.1, однак з врахуванням іншого напрямку передавання (висхідний канал).
- 5) Стандартизовані значення корисної пропускної здатності в розрахунку на кадр та один ресурсний блок.
- 6) Виграш по ресурсах виділених для сигналізаційних даних для висхідного каналу при швидкостях взятих із програмного забезпечення LTE Downlink Resource Element Visualisation v1.1 та стандартизованих відповідно.

При поширенні радіосигналу в просторі він зазнає загасання. При значному загасанні приймальна антена може не розпізнати його. Тому значення загасання є важливим параметром, який потрібно враховувати при проектуванні безпроводних мереж зв'язку. Значення загасання радіосигналу тісно пов'язане із відношенням сигнал/шум, яким оперує базова станція при визначенні модуляційно-кової схеми.

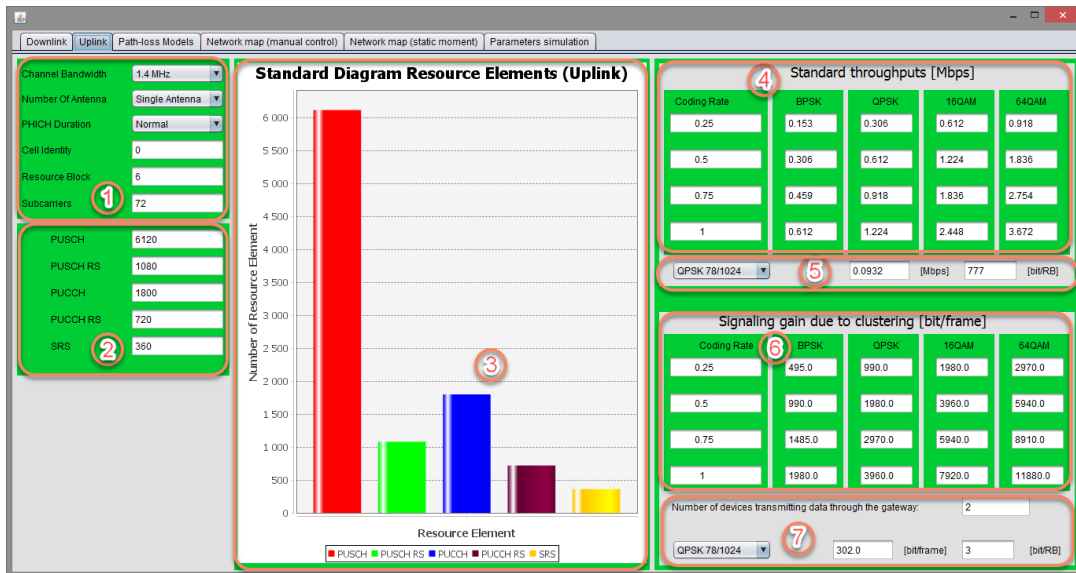


Рис. 3.14. Вкладка висхідного каналу зв'язку

Моделі розрахунку загасання радіосигналу поділяються на емпіричні та аналітичні. Відомі моделі враховують значення таких параметрів як: висота над рівнем моря передавальної антени, приймальної антени, коефіцієнти підсилення приймальної та передавальної антен, відстань між передавальною та приймальною антенами, а також несуча частота. Крім моделі, вони можуть враховувати тип місцевості.

Існують стандартні моделі, які дають змогу визначити загасання радіосигналу, до яких належать:

- модель поширення радіосигналу у вільному просторі;
- модель Okumura;
- модель Nata;
- модель COST-231 Nata та інші.

Також є і замовна модель, яка заснована на моделі Nata і дозволяє її модифікувати. Тобто шляхом підбору постійних коефіцієнтів досягти відповідності результатів теоретичних розрахунків і вимірювань для конкретної місцевості. Формула для визначення загасання згідно замовної моделі наступна (дБм):

$$L = c_1 + c_2 \times \lg(f) - c_3 \times \lg(h_t) - A(h_r) + (c_4 - c_5 \times \lg(h_t)) \times \lg(d), \quad (3.1)$$

де: c_n - коефіцієнти замовної моделі; f - несуча частота, МГц; h_t - висота передавальної антени, м; h_r - висота приймальної антени, м; d - відстань між передавальною та приймальною антенами, км; $A(h_r)$ - поправочний коефіцієнт для висоти антени рухомого об'єкта, що залежить від типу місцевості.

Для малих і середніх міст формула для визначення поправочного коефіцієнта наступна, (дБм):

$$A(h_r) = (c_6 \times \lg(f) - c_7) \times h_r - (c_8 \times \lg(f) - c_9). \quad (3.2)$$

Для великих міст, (дБм):

$$A(h_r) = c_6 \times \lg(c_7 \times f)^2 - c_8. \quad (3.3)$$

Для визначення відношення сигнал/шум за відомого значення загасання сигналу використаємо формулу:

$$SNR = 10 \times \lg \left(\frac{P_{rec} (мВт)}{P_{noise} (мВт)} \right), \quad (3.4)$$

де: $P_{rec} (мВт)$ - потужність прийнятого сигналу, мВт; $P_{noise} (мВт)$ - потужність Гаусового шуму, мВт ($P_{noise} = 1,8 \times 10^{-12}$ мВт).

З формули 3.4 потужність прийнятого сигналу (мВт) становить:

$$P_{rec} = 1,8 \times 10^{-12} \times 10^{\frac{SNR}{10}} = 1,8 \times 10^{\frac{SNR}{10} - 12}. \quad (3.5)$$

Для переведення у відносну величину можна використати формулу, (дБм):

$$P_{rec} (дБм) = 10 \times \lg \left(\frac{P_{rec} (мВт)}{1 мВт} \right). \quad (3.6)$$

З іншого боку потужність прийнятого сигналу рівна різниці потужності випроміненого сигналу і загасання сигналу в просторі (дБм):

$$P_{rec} (дБм) = P_{trans} (дБм) - PL (дБм), \quad (3.7)$$

де: $P_{trans} (дБм)$ - потужність випроміненого сигналу, дБм; $PL (дБм)$ - загасання сигналу при поширенні у просторі.

Визначене значення відношення сигнал/шум використовується базовою станцією при визначенні індикатора якості каналу, за яким жорстко закріплена модуляційно-кодова схема, з допомогою якої визначається пропускна здатність для користувача.

Вкладка Path-loss Models (рис. 3.15) містить 4 області. В області 1 відображено параметри, які впливають на значення загасання радіосигналу для відомих моделей розрахунку загасання радіосигналу. Область 2 призначена для підбору коефіцієнтів, які враховують особливості середовища, в якому поширюється радіосигнал і за допомогою них визначає загасання. Область 3 призначена для виводу повідомлення про коректність введення параметрів (область 1), при яких моделі дають мінімальні похибки у значеннях загасання радіосигналу. Область 4 відповідає за графічне відображення загасання радіосигналу від зміни відстані. Всім всі інші параметри приймаються такими, які прописані у відповідному місці області 1.

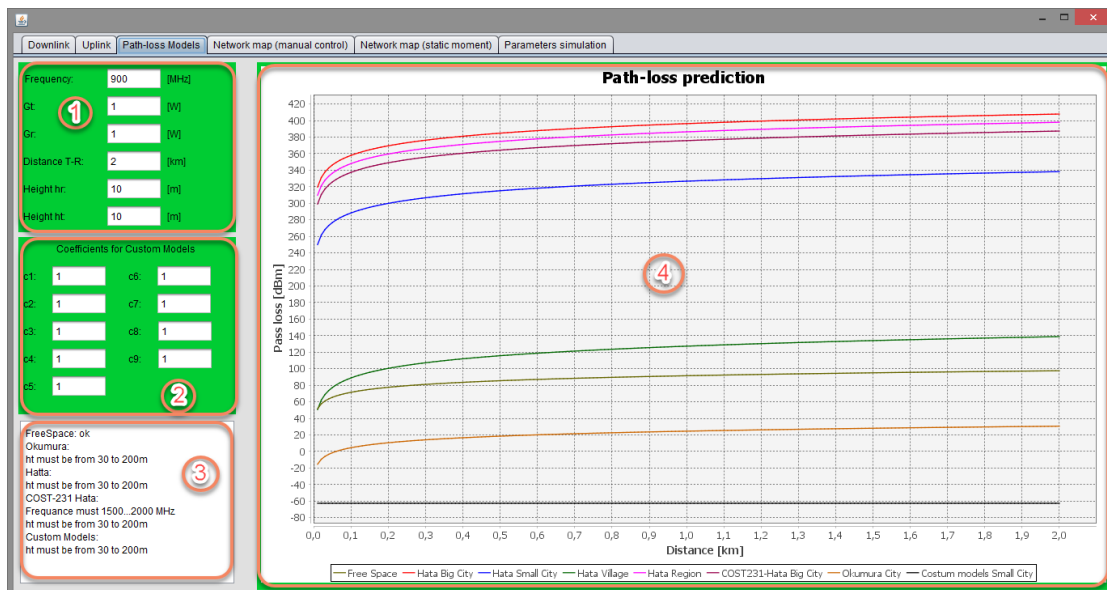


Рис. 3.15. Вигляд вкладки Path-loss Models

Імітаційна модель також містить вкладку (рис. 3.16) для дослідження параметрів, які впливають на кількість ресурсів, що можуть бути виділені базовою станцією в залежності від переміщення абонента. У області 1 можна вибрати напрямок передавання, тривалість циклічного префіксу, кількість антен

на передачу та прийом, а також коефіцієнт, що впливає на кількість виділених ресурсів під повідомлення. Области 2, та 4 відповідають за графічне відображення зміни відстані до базової станції та параметра SNR відповідно, з якого базова станція робить перерахунок і визначає значення параметра CQI (область 3). Під кожним значенням CQI, згідно стандарту, закріплена модуляційно-кодова схема, яка впливає на максимальну пропускну здатність, яку базова станція може виділити досліджуваному абоненту.

Збирання та опрацювання параметрів, що відображені у вкладці Network map (manual control) при класичній архітектурі LTE робить контролер. Однак при введенні мультистандартного шлюза частину обчислень пов'язаних із M2M на себе візьме він. Таким чином, відбудеться розвантаження контролера базової станції.

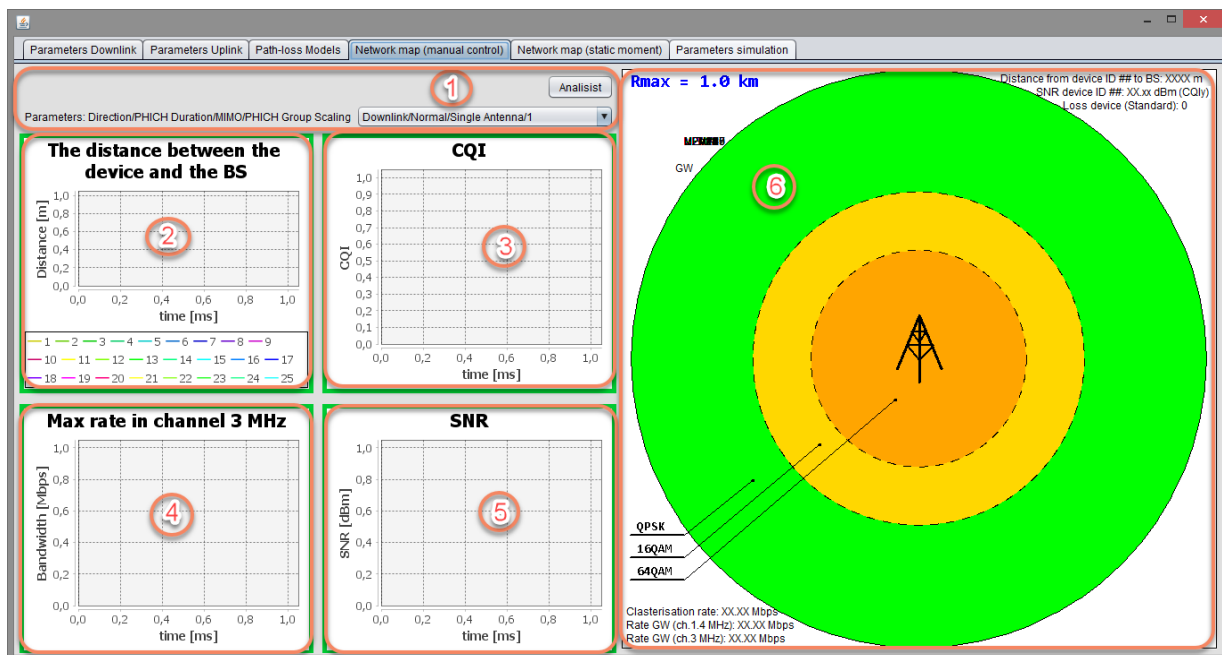


Рис. 3.16. Вкладка для дослідження параметрів, що комплексно впливають на кількість ресурсів для конкретного абонента

В лівій нижній частині області 6 виділено місце для відображення сумарного значення пропускну здатності, яку вимагають M2M датчики, а також доступні пропускну здатності шлюза в каналах 1,4 МГц та 3 МГц.

Імітаційна модель також надає можливість побачити інші параметри такі як: відстань до базової станції для конкретного активного абонента (пристрою) (область 1), пропускну здатність, що вимагають сервіси, якими хочуть скористатися ці абоненти (датчики) (область 2) і доступні швидкості для кожного з них у каналах 1,4 МГц та 3 МГц (область 3, 4 відповідно), а також неефективність використання ресурсів при обслуговуванні цих абонентів (датчиків) згідно класичної архітектури та доповненої мультистандартним шлюзом (область 5). Всі графічні значення вищезгаданих параметрів відображено у вкладці Network map (static moment). Загальний вигляд цієї вкладки показано на рис. 3.17.

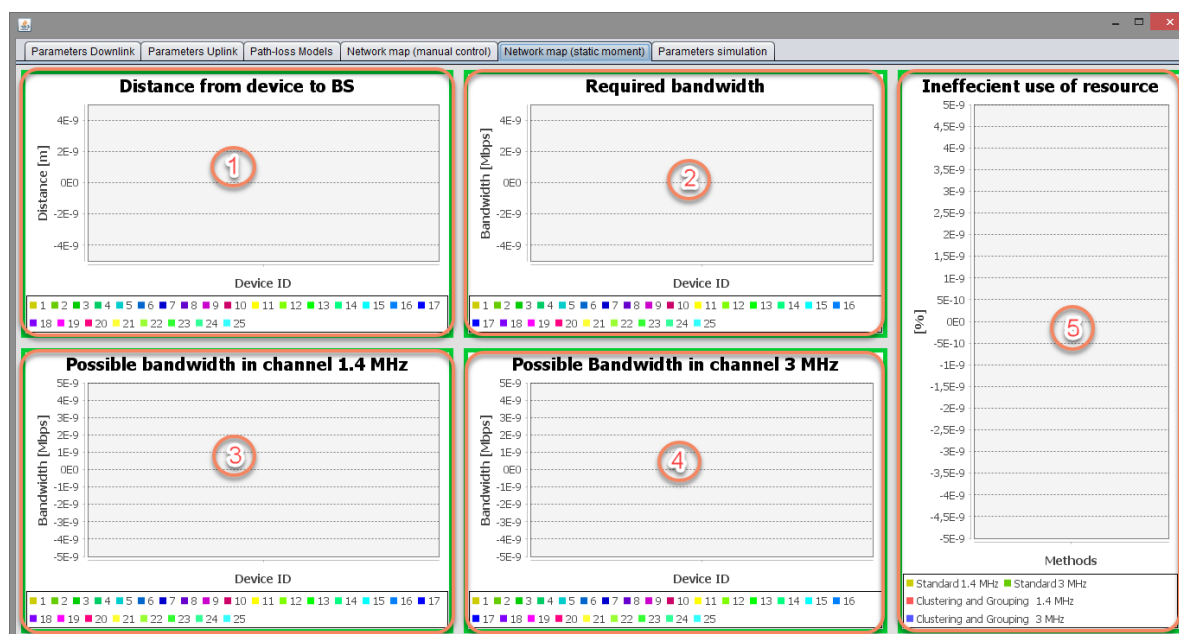


Рис. 3.17. Загальний вигляд вкладки Network map (static moment)

Описані вище вкладки імітаційної моделі надають тільки базові представлення про можливості обслуговування абонентів (пристроїв). Однак цього достатньо для підрахунку приблизного виграшу по використанню ресурсів базової станції при доповненні класичної архітектури LTE мультистандартним шлюзом. Для більше детального моделювання в імітаційній моделі передбачено ще одну вкладку, яка названа Parameters simulation. Загальний вигляд цієї вкладки подано на рис. 3.18.



Рис. 3.18. Загальний вигляд вкладки Parameters simulation

На цій вкладці у області 1 зібрано мінімальні та максимально можливі пропускні здатності для сервісів, що будуть використовувати мобільні (9 пріоритетів) та M2M пристроїв (4 класи). Необхідність аж двох значень пропускної здатності (мінімальної та максимальної) можна пояснити тим фактом, що для пристрою з відповідним пріоритетом (мобільний користувач) чи класом (M2M) існують різні сервіси. Так ось, якщо взяти, наприклад, M2M пристрої клас 1, то пристрої цього класу можуть працювати із сервісами, вимоги до пропускної здатності яких коливаються в межах від мінімального (2 Мбіт/с) до максимального значення (3,5 Мбіт/с).

Область 2 відображає максимально допустимі затримки для кожного із класів (M2M пристрої) та 9 пріоритетів мобільних користувачів.

Області 3 та 4 дають змогу встановлювати інтенсивність передавання даних для 4 класів (M2M пристрої) та 9 пріоритетів мобільних користувачів відповідно.

3.2.2. Дослідження мобільності абонентів гетерогенної мережі 4G/5G

Дослідження мобільності абонентів гетерогенної мережі проведемо на основі переміщення одного абонента по території обслуговування базової станції. Для групи абонентів результати дослідження будуть схожими з врахуванням їх кількості.

Отже, дослідження проведемо для кількості антен на передачу 1, нормального циклічного префіксу та при значенні RNTN Group Scaling, що рівний 1. У верхньому лівому куті карти з базовою станцією розміщені випадково згенеровані мобільні пристрої та M2M датчики з відповідними різними вимогами до пропускної здатності (див. рис. 3.19).

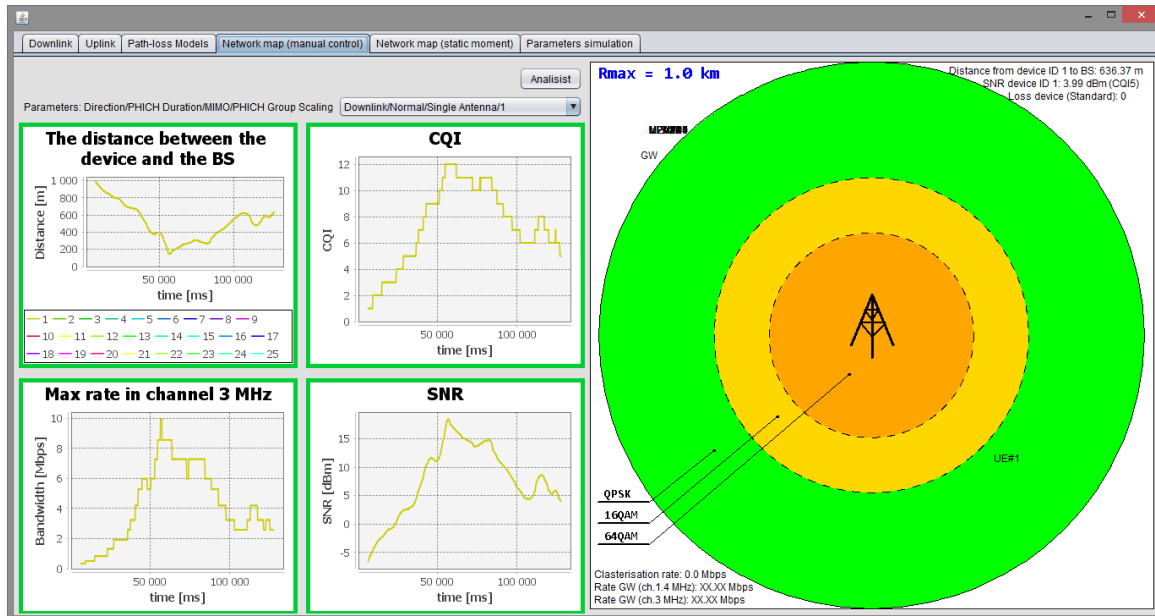


Рис. 3.19. Дослідження мобільності одного з абонентів мережі LTE

Першим згенерованим пристроєм є мобільний. Переміщаємо його по території покриття базової станції. Бачимо, що відстань між мобільним пристроєм та базовою станцією змінюється. Спочатку абонент рухався до базової станції, після цього дещо віддалився від неї і зупинився на відстані 636,37 м. При русі абонента змінювалися умови радіоканалу, що впливали на відношення сигнал/шум, зміна значень яких показана на графіку з назвою «SNR». У відповідності до кожної точки на цьому графіку імітаційною моделлю будувалася крива зміни індикатора якості каналу, за кожним значенням якої

закріплена модуляційно-кодова схема. Модуляційно-кодова схема впливає за максимальне значення пропускної здатності. Максимальне значення пропускної здатності для каналу 3 МГц відображено графіком, що розташований у лівому нижньому куті вкладки Network map (manual control). На поточний момент часу пропускна здатність становить 2,7 Мбіт/с.

У правому верхньому куті карти території обслуговування базової станції виведені числові значення відстані до базової станції, відношення сигнал/шум та загальна кількість втрачених пристроїв, станом на поточний момент часу.

3.2.3. Дослідження доступності ресурсів базової станції в залежності від розташування абонентів/M2M пристроїв

Для дослідження доступності частотно-часових ресурсів в залежності від розташування абонентів (пристроїв) виберемо дві антени на передачу та нормальний циклічний префікс. Будемо переміщувати випадково згенеровані пристрої на території обслуговування базової станції. Всіх абонентів, що обслуговує базова станція, показано на рис. 3.20.

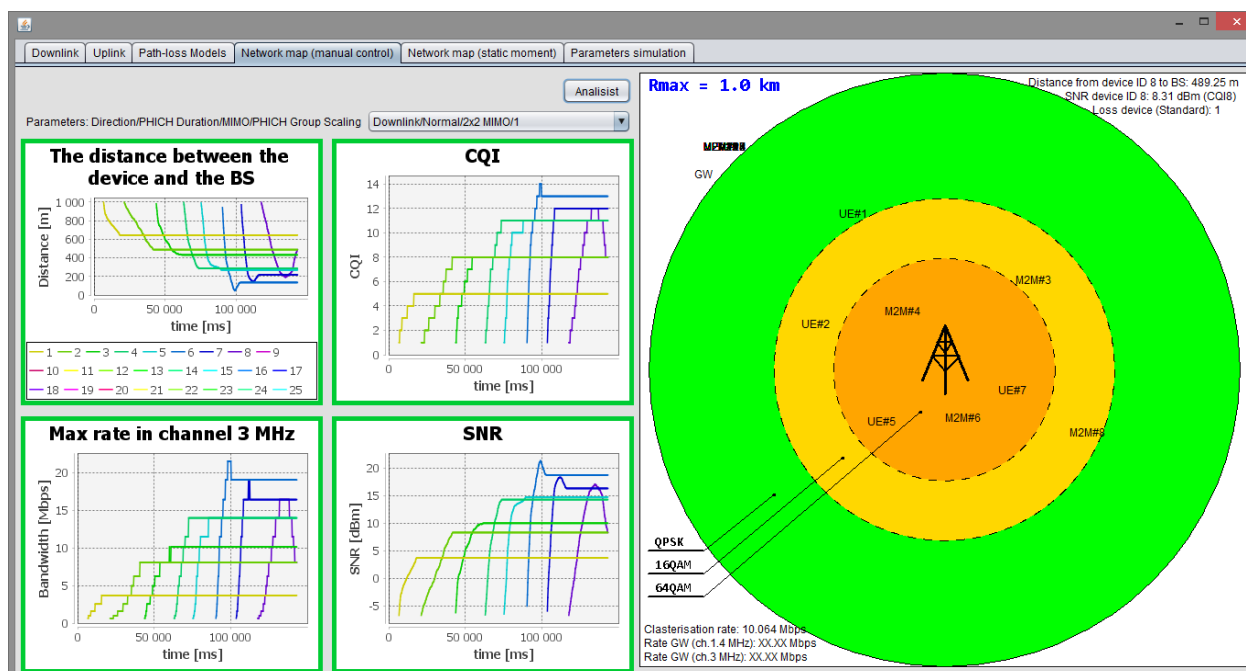


Рис. 3.20. Дослідження доступності ресурсів базової станції в залежності від розташування абонентів (пристроїв)

Імітаційна модель перераховує значення чотирьох графіків при пересуванні одного з абонентів чи датчика. Для статичних абонентів відповідні значення графіків залишаються на одному рівні. Останнім пристроєм, динаміку руху якого досліджено, був M2M#8. Йому ресурсів не вистачило, тому він втрачений. Вимоги до пропускної здатності всіх активних пристроїв, а також можливі пропускні здатності в каналах 1,4 МГц та 3 МГц показано на рис. 3.21.

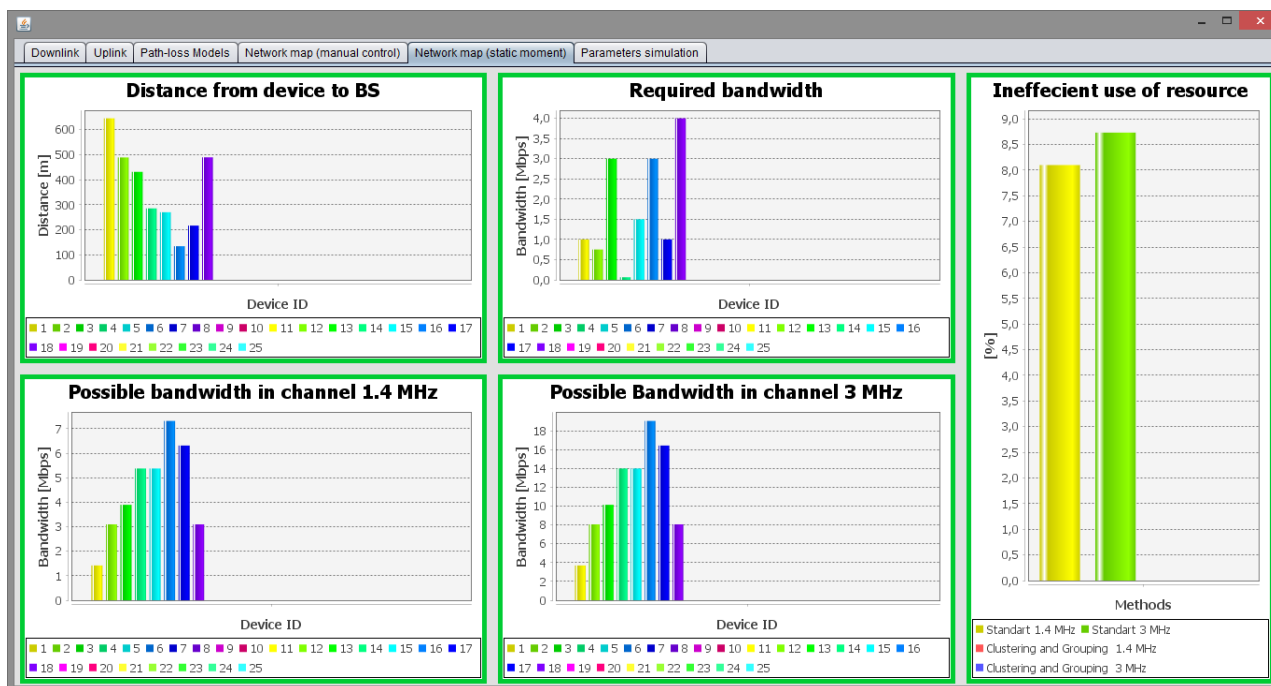


Рис. 3.21. Параметри комплексного впливу на якість обслуговування

Як бачимо, останній рухливий пристрій вимагає забезпечити йому 4 Мбіт/с. У смузі 1,4 МГц він максимально може отримати 3,1 Мбіт/с, а в смузі 4 МГц – 8 Мбіт/с. Враховуючи те, що для всіх інших пристроїв виділено певний необхідний об'єм частотно-часових ресурсів, він був втраченим. Крайній правий графік на рис.3.21 показує неефективність використання доступних ресурсів, а саме смуги 1,4 і 3 МГц. При переміщенні M2M пристрою ближче до базової станції він може бути обслуженим за рахунок кращого значення відношення сигнал/шум, що дозволить контролеру зарезервувати меншу кількість субкадрів в одній зі смуг 1,4 МГц або 3 МГц.

3.2.4. Дослідження можливостей забезпечення якості обслуговування для сервісів згенерованих мобільними користувачами та IoT/M2M датчиками згідно класичної архітектури та доповненої мультистандартним шлюзом

При обслуговуванні мобільних пристроїв та M2M датчиків без пріоритетизації трафіку всі поступленні вхідні заявки на обслуговування будуть розглядатися контролером базової станції згідно черги FIFO (першим поступив на обслуговування – першим буде обслужений).

На рис. 3.22 показано розташування мобільних пристроїв та M2M датчиків, при якому всім забезпечуються необхідні ресурси для передавання даних. Як бачимо, на території обслуговування базової станції знаходяться 5 користувачів з мобільними пристроями та 4 M2M датчики. Мобільний пристрій з ідентифікатором 9 втрачений, оскільки об'єм ресурсів, що необхідний йому для передавання даних, не може бути наданий, через те, що всі інші пристрої, що знаходяться на території базової станції, забезпечені необхідною їм пропускною здатністю, а залишкова кількість субкадрів (якщо вона взагалі є) недостатня для задоволення потреб втраченого мобільного пристрою.

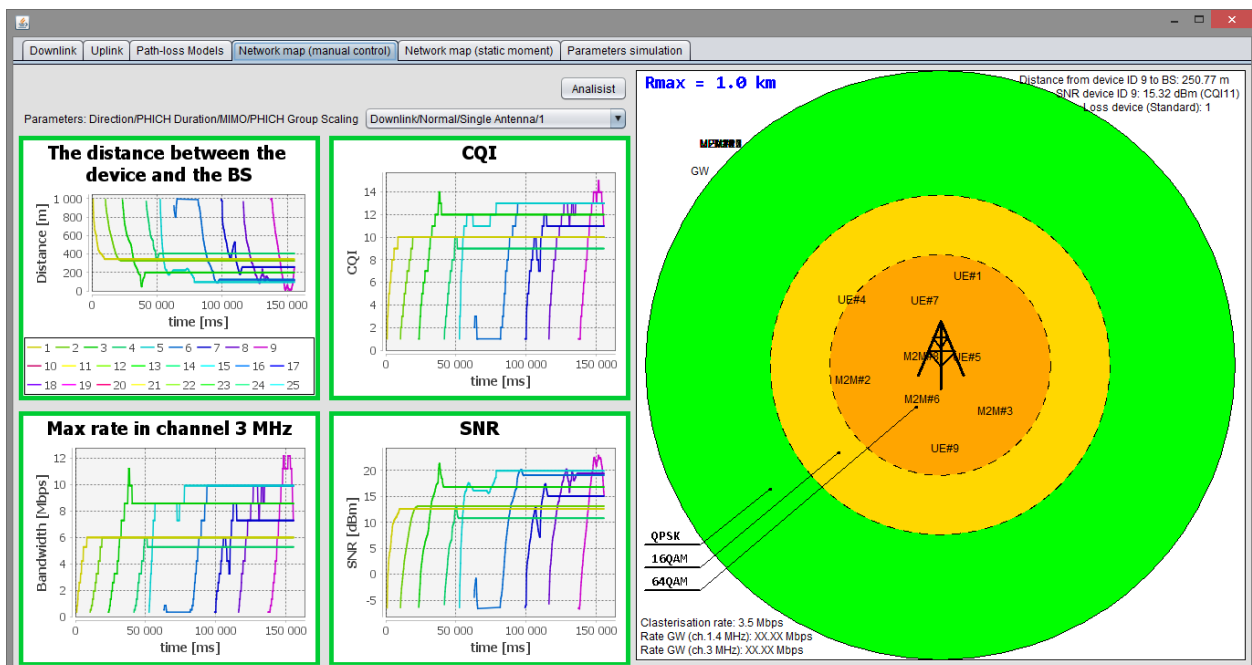


Рис. 3.22. Розташування мобільних пристроїв та M2M датчиків при дослідженні можливостей забезпечення якості обслуговування згідно класичної архітектури без врахування пріоритетів сервісів



Рис. 3.23. Вимоги по необхідній швидкості передавання мобільних пристроїв та M2M датчиків при дослідженні можливостей забезпечення якості обслуговування згідно класичної архітектури без врахування пріоритетів сервісів

Як бачимо мобільний пристрій з ідентифікатором 9 вимагав пропускної здатності 4 Мбіт/с. Також спостерігаємо неефективність використання зайнятих субкадрів в смузі 1,4 МГц (10,8%) та 3 МГц (3%).

Дослідження на рис. 3.22 та 3.23 проводилося для обслуговування пристроїв та датчиків згідно класичної архітектури. Тепер проведемо аналогічне дослідження при доповненні цієї архітектури мультистандартним шлюзом. На рис. 3.24 показано розташування всіх пристроїв та датчиків, які в поточний момент часу мають необхідність передавання даних. Вимоги щодо необхідної швидкості передавання, що представлені на рис. 3.25, аналогічні до вимог, які показані на рис. 3.23. Як бачимо із рис. 3.25 неефективність використання смуги 1.4 МГц зменшилося до 0,29 %, а смуга 3 МГц повністю звільнилася. Враховуючи те, що на мультистандартному шлюзі трафік сортується на 4 черги: трафік реального часу висока пропускна здатність, трафік реального часу низька пропускна здатність, трафік нереального часу висока пропускна здатність та трафік нереального часу низька пропускна здатність, обслуговування кожного із яких відбувається із врахуванням

максимально допустимого часу обслуговування, можна стверджувати, що втрати при доповненні класичної архітектури мультистандартним шлюзом прямуватимуть до нуля.

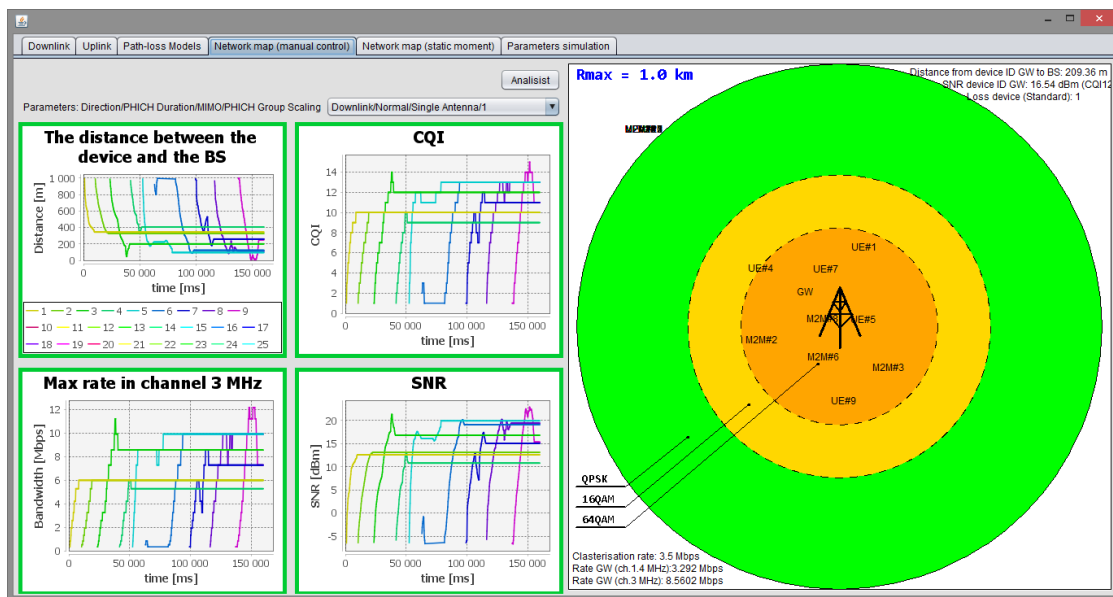


Рис. 3.24. Розташування мобільних пристроїв та М2М датчиків при дослідженні можливостей забезпечення якості обслуговування згідно класичної архітектури, доповненої мультистандартним шлюзом, без врахування пріоритетів сервісів



Рис. 3.25. Вимоги по необхідній швидкості передавання мобільних пристроїв та М2М датчиків при дослідженні можливостей забезпечення якості обслуговування згідно класичної архітектури, доповненої мультистандартним шлюзом, без врахування пріоритетів сервісів

3.2.5. Можливість забезпечення надання сервісу шляхом аналізу необхідної пропускної здатності

Можливість забезпечення надання сервісу шляхом аналізу необхідної пропускної здатності для випадку обслуговування трафіку класичною архітектурою LTE проведемо для розташування мобільних абонентів та M2M пристроїв, як показано на рис. 3.26. Спочатку покажемо, якими будуть втрати та неефективність використання каналів в смугах 1,4 та 3 МГц без аналізу необхідної пропускної здатності.

Для цього дослідження припускаємо, що контролер базової станції намагається обслужити якомога більшу кількість пристроїв та датчиків, навіть в умовах обмеженої кількості частотно-часових ресурсів, але без врахування пріоритетів.

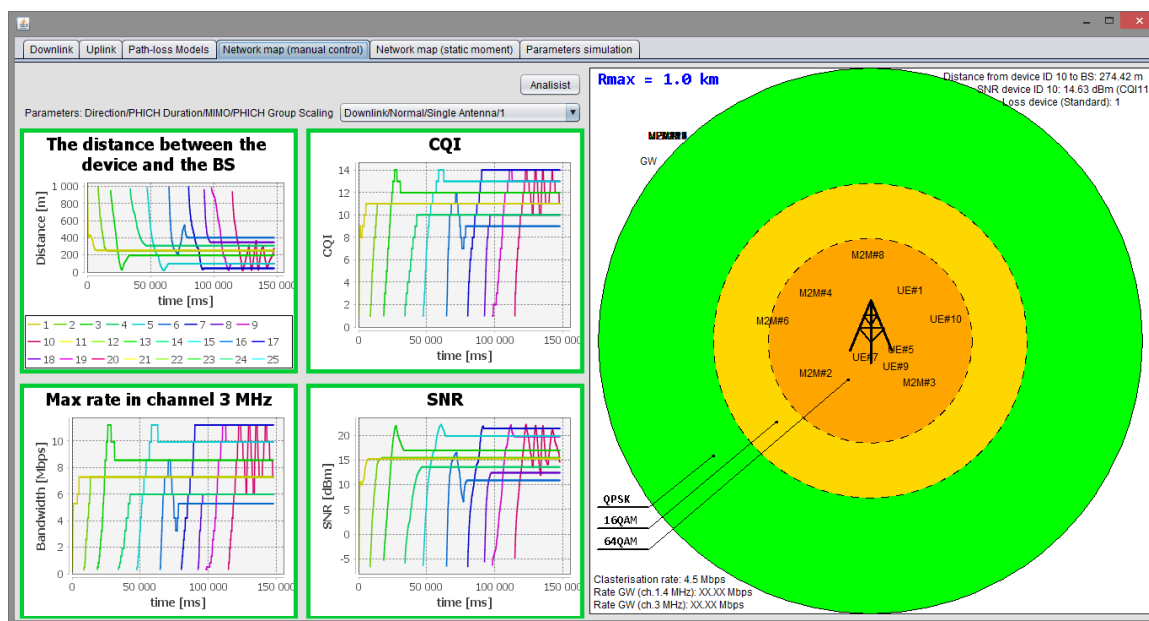


Рис. 3.26. Розташування мобільних пристроїв та M2M датчиків при дослідженні можливості забезпечення надання сервісу без аналізу необхідної пропускної здатності при обслуговуванні згідно класичної архітектури LTE без врахування пріоритетів сервісів

Як бачимо із рис. 3.26 на території обслуговування базової станції знаходиться 5 M2M пристроїв та 5 мобільних користувачів. Останній, з ідентифікатором 10, втрачений. Вимоги до пропускної здатності цих пристроїв

та датчиків показано на рис. 3.27. Із рис. 3.27 бачимо, що мобільний пристрій з ідентифікатором 10 вимагає забезпечити йому пропускну здатність об'ємом 3,5 Мбіт/с. У смузі 1,4 МГц він міг би отримати 2,7 Мбіт/с, а в смузі 3 МГц 7,2 Мбіт/с. Але у зв'язку з тим, що всі попередні пристрої та датчики з ідентифікаторами, що менші 10, зайняли субкадри в цих смугах і для втраченого мобільного пристрою кількість вільних субкадрів недостатня для задоволення потреб у передаванні даних.



Рис. 3.27. Вимоги до пропускну здатності мобільних пристроїв та M2M датчиків при дослідженні можливості забезпечення надання сервісу без аналізу необхідної пропускну здатності при обслуговуванні згідно класичної архітектури LTE без врахування пріоритетів сервісів

Також проведемо дослідження для випадку доповнення класичної архітектури LTE мультистандартним шлюзом без врахування пріоритетів сервісів. Результати показано на рис. 3.28 та 3.29. Шлюз розташований в таких радіоумовах, згідно яких йому може бути надана максимальна пропускну здатність в каналі 1,4 МГц 2,8027 Мбіт/с, а в смузі 3 МГц – 7,2877 Мбіт/с. Загальна, згрупована пропускну здатність становить 4,5 Мбіт/с.

Як бачимо із рис. 3.29 неефективність використання субкадрів в смузі 1,4 МГц становить 0,38 %, натомість в смузі 3 МГц – практично рівна 0.

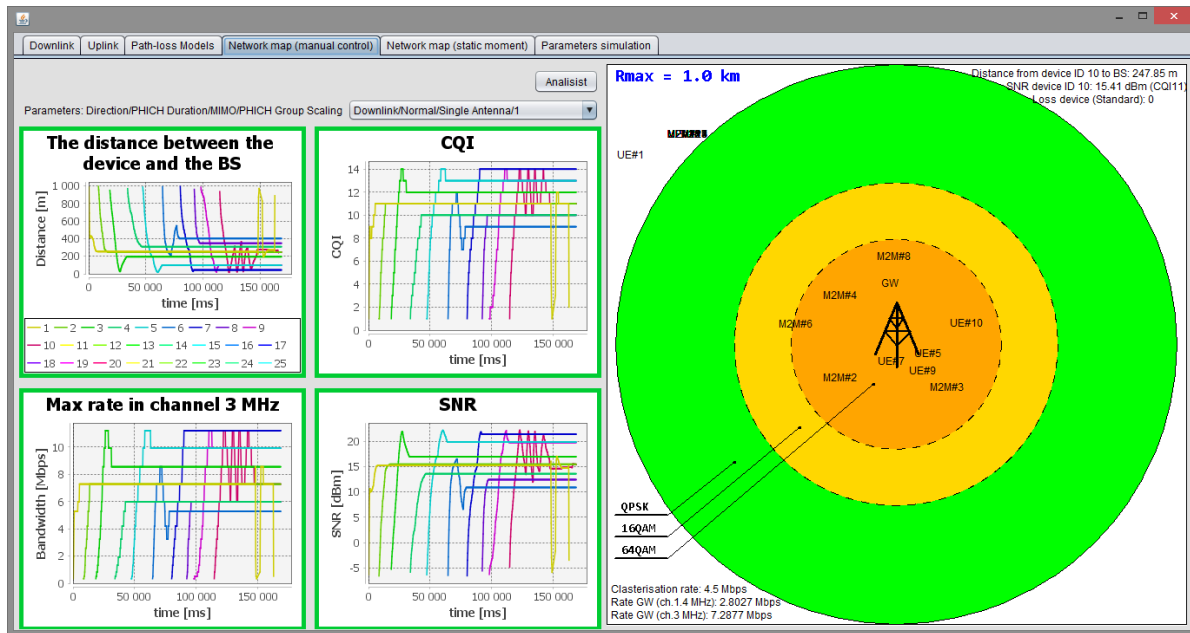


Рис. 3.28. Розташування мобільних пристроїв та M2M датчиків при дослідженні можливості забезпечення надання сервісу без аналізу необхідної пропускної здатності при обслуговуванні згідно класичної архітектури LTE, доповненої мультистандартним шлюзом, без врахування пріоритетів сервісів

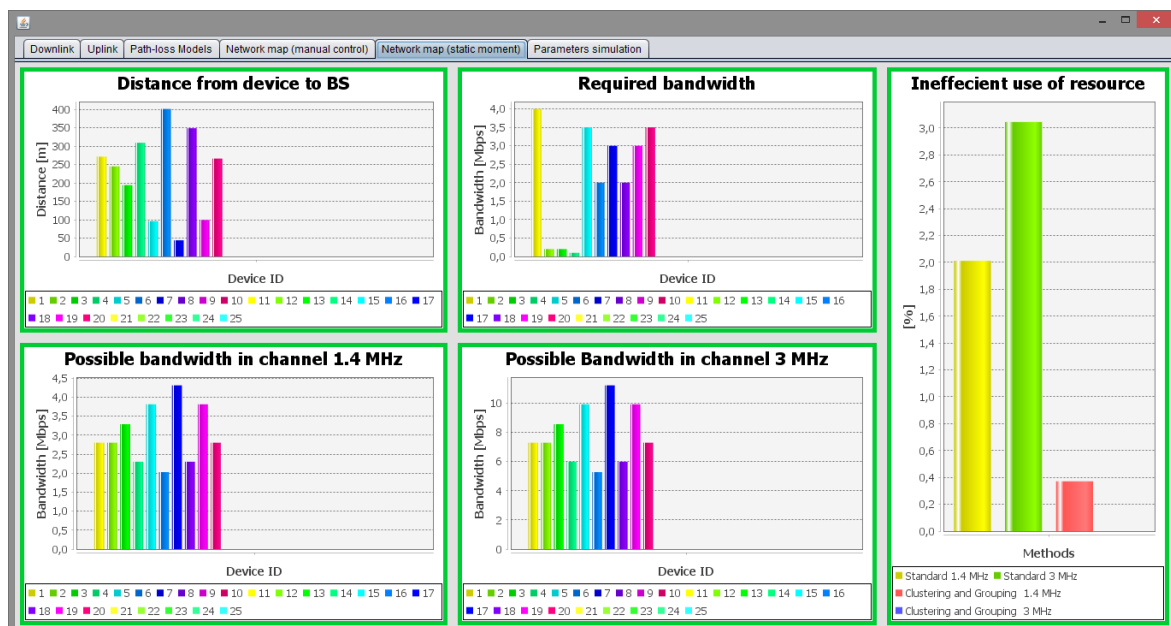


Рис. 3.29. Вимоги до пропускної здатності мобільних пристроїв та M2M датчиків при дослідженні можливості забезпечення надання сервісу без аналізу необхідної пропускної здатності при обслуговуванні згідно класичної архітектури LTE, доповненої мультистандартним шлюзом, без врахування пріоритетів сервісів

Тепер проведемо дослідження, суть якого полягає в тому, щоб забезпечити якомога більшу кількість користувачів та M2M пристроїв частотно-часовими ресурсами шляхом аналізу пріоритетів. В цьому дослідженні суть забезпечення якомога більшої кількості пристроїв та датчиків ресурсами базової станції полягає у відмові обслуговування для пристрою(їв), який(і) вимагає(ють) значну кількість субкадрів в одній з смуг 1,4 МГц або 3 МГц на користь кількості пристроїв (датчиків), які вимагають на порядок меншого об'єму (або рівного) частотно-часових ресурсів.

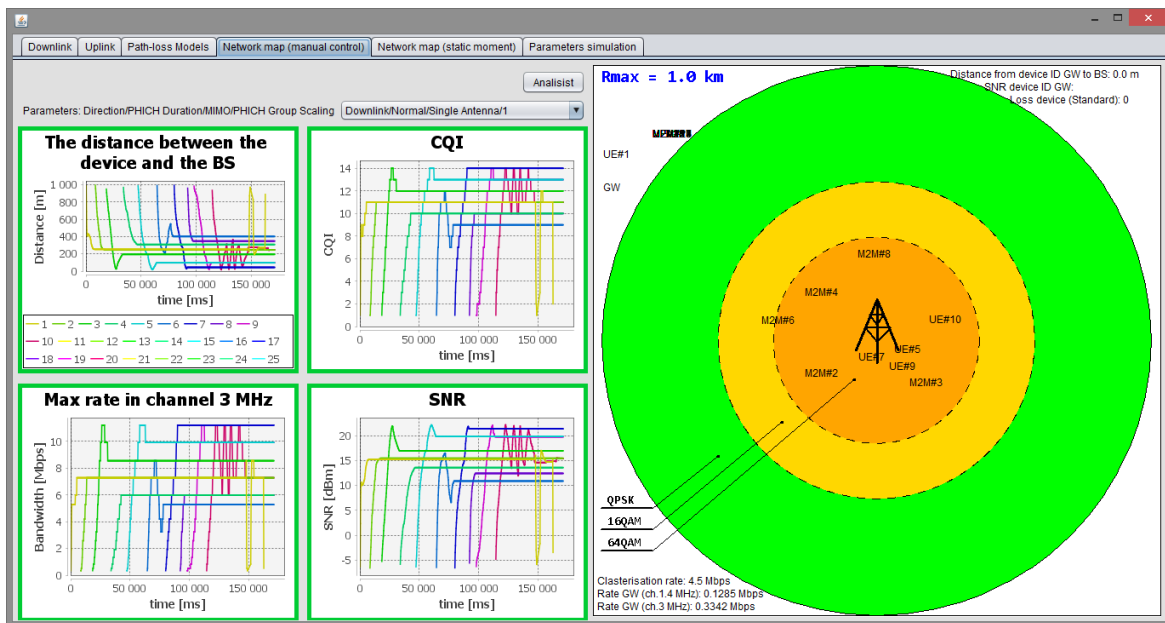


Рис. 3.30. Розташування мобільних пристроїв та M2M датчиків при дослідженні можливості забезпечення надання сервісу шляхом аналізу необхідної пропускної здатності при обслуговуванні згідно класичної архітектури LTE з врахуванням пріоритетів сервісів

На рис. 3.30 показано розташування мобільних пристроїв та M2M датчиків для випадку їх обслуговування згідно класичної архітектури LTE з врахування пріоритетів сервісів та із аналізом необхідної пропускної здатності. Виділення ресурсів у цьому випадку відбувається після аналізу вимог всіх пристроїв та датчиків, які в поточний момент вже передають певний об'єм даних. Як бачимо вивільнення ресурсів для пристрою з ідентифікатором 10 відбулося за рахунок

відмови в обслуговуванні (відтермінуванні передавання даних) мобільного пристрою з ідентифікатором 1. Вимоги до пропускних здатностей для цих пристроїв, а також неефективність використання для цього етапу дослідження показано на рис. 3.31. Неефективність використання зарезервованих субкадрів в смузі 1,4 МГц становить 2,01%, а в смузі 3 МГц – 2,035%. Як бачимо із рис. 3.31 10 вимоги до пропускної здатності для пристрою 1 не бралися до уваги (пропускна здатність для нього була 4 Мбіт/с). Натомість забезпечено обслуговування для мобільного пристрою із ідентифікатором 10, який вимагає забезпечити для його сервісу пропуску здатність 3,5 Мбіт/с.

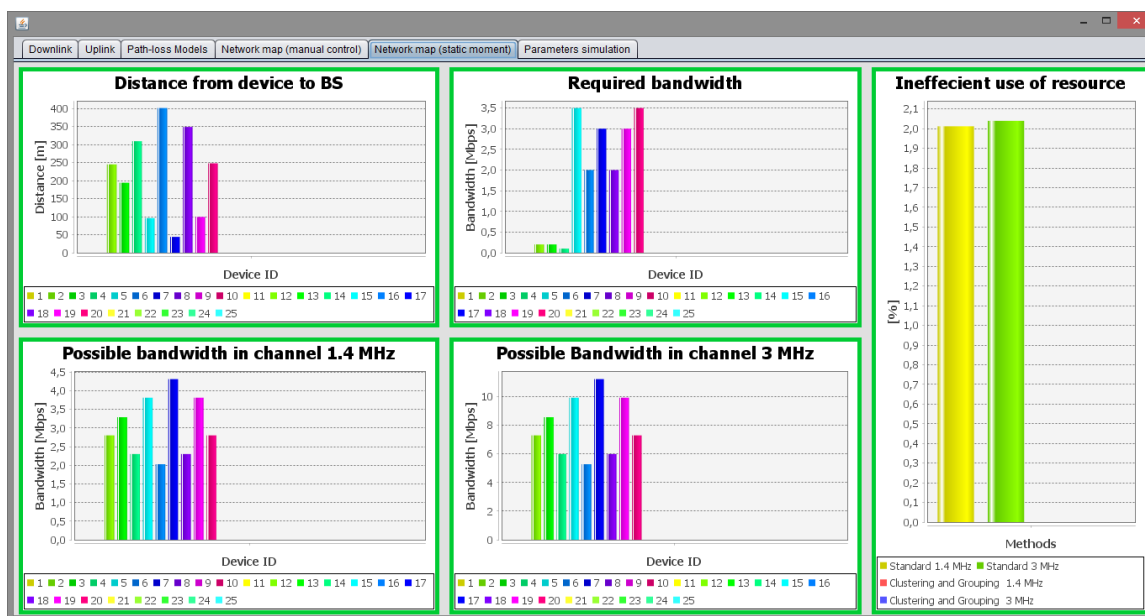


Рис. 3.31. Вимоги до пропускної здатності мобільних пристроїв та M2M датчиків при дослідженні можливості забезпечення надання сервісу шляхом аналізу необхідної пропускної здатності при обслуговуванні згідно класичної архітектури LTE без врахування пріоритетів сервісів

Тепер проведемо дослідження для випадку доповнення класичної архітектури LTE мультистандартним шлюзом. Результати імітаційного моделювання показано на рис. 3.32 та 3.33. Згідно отриманих результатів бачимо, що неефективність використання ресурсів базової станції в смугах 1,4 МГц та 3 МГц практично не змінилася в порівнянні із рис. 3.31.

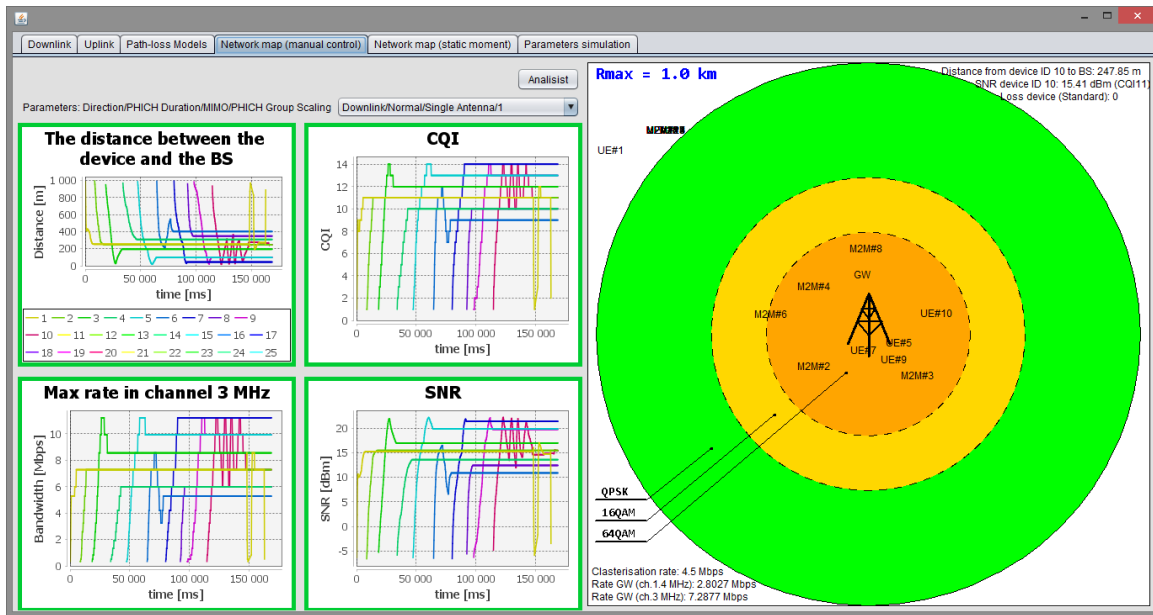


Рис. 3.32. Розташування мобільних пристроїв та M2M датчиків при дослідженні можливості забезпечення надання сервісу шляхом аналізу необхідної пропускної здатності при обслуговуванні згідно класичної архітектури LTE, доповненої мультистандартним шлюзом, з врахуванням пріоритетів сервісів

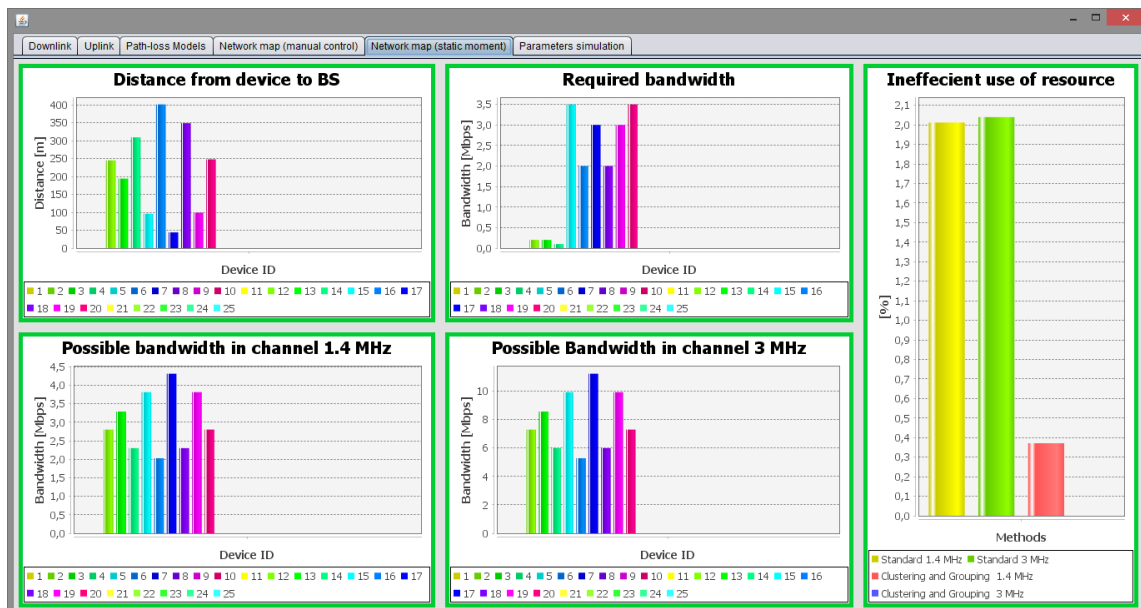


Рис. 3.33. Вимоги до пропускної здатності мобільних пристроїв та M2M датчиків при дослідженні можливості забезпечення надання сервісу шляхом аналізу необхідної пропускної здатності при обслуговуванні згідно класичної архітектури LTE, доповненої мультистандартним шлюзом, без врахування пріоритетів сервісів

3.2.6. Дослідження можливості зменшення відсотку «простою» субкадрів

Доповнення класичної архітектури мультистандартним шлюзом не завжди буде ефективним. Ефективність буде чітко спостерігатися при введенні шлюза на територію, з якої до базової станції від одного M2M пристрою передаються такі дані, для яких, при резервуванні потрібної кількості субкадрів, буде спостерігатися у зв'язку із їх завеликою кількістю. Меншу кількість ресурсів не можливо виділити по двом причинам, перша із яких: може значно погіршитися якість надання послуг для сервісу (аж до його незадовільної кількості потрібних ресурсів), а друга: неможливість виділення у зв'язку із чітко прописаною у стандарті умовою, що для одного пристрою (датчика) контролер може виділяти ресурси тривалістю 1 мс в часовій області (один субкадр) і всі ресурси в частотній області.

Враховуючи те, що мультистандартний шлюз по сигналізаційних каналах буде спілкуватися із контролером базової станції та надсилатиме йому інформацію про необхідну кількість ресурсів, для даних, згенерованих згрупованими в межах кластерів, пристроїв, а також те, що він розприділятиме ці дані по чергах, поступове вивільнення яких буде здійснювати із врахуванням завантаженості ресурсної сітки базової станції, а також максимально допустимого часу обслуговування проведемо наступне дослідження. Враховуючи те, що на території дії мультистандартного шлюза будуть такі датчики, які передаватимуть дані в чітко визначені (детерміновані) моменти часу, можна цим скористатися і зменшити відсоток неефективного резервування субкадрів. Тому суть цього дослідження полягає у зменшенні відсотку неефективного використання зарезервованих субкадрів за рахунок тимчасової зміни детермінованих моментів передавання даних для одного датчика або групи датчиків. Для доведення цієї думки дослідження проведемо поетапно, в процесі яких покажемо доцільність використання такого способу зменшення відсотку «простою» субкадрів.

На рис. 3.34 продемонстровано розташування мобільних пристроїв та M2M датчиків для випадку їх обслуговування згідно класичної архітектури LTE, доповненої мультистандартним шлюзом без врахування пріоритетів.

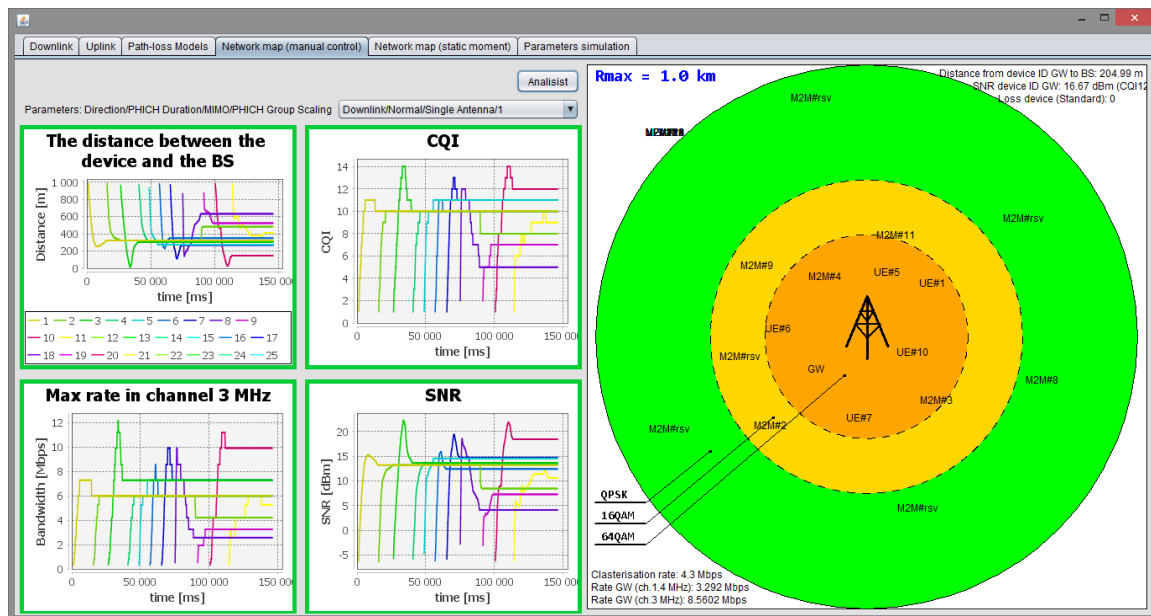


Рис. 3.34. Розташування мобільних та M2M датчиків для випадку їх обслуговування згідно класичної архітектури LTE, доповненої мультистандартним шлюзом, без врахування детермінованих початків передавання даних

Як бачимо на території обслуговування базової станції встановлено один мультистандартний шлюз, через який, в поточний момент часу, передають дані 6 M2M датчиків, при цьому є ще 5, які будуть передавати дані згідно детермінованого моменту часу (в поточний момент часу неактивні). За рахунок тимчасової зміни детермінованих моментів початку передавання даних можна зменшити відсоток «простою» субкадрів.

На рис. 3.35 продемонстровано їх вимоги до пропускної здатності та неефективність використання доступних смуг. Також наведемо результат врахування детермінованих моментів передавання даних «резервними» датчиками, тобто тими, які передають дані у чітко визначені моменти часу (детерміновані). На рис. 3.36 показано якими будуть відсотки «простою» при врахуванні цих резервних датчиків.



Рис. 3.35. Вимоги до пропускної здатності та неефективність використання доступних ресурсів мобільними та M2M датчиками при їх обслуговуванні класичною архітектурою LTE, доповненою мультистандартним шлюзом, без врахування детермінованих початків передавання даних

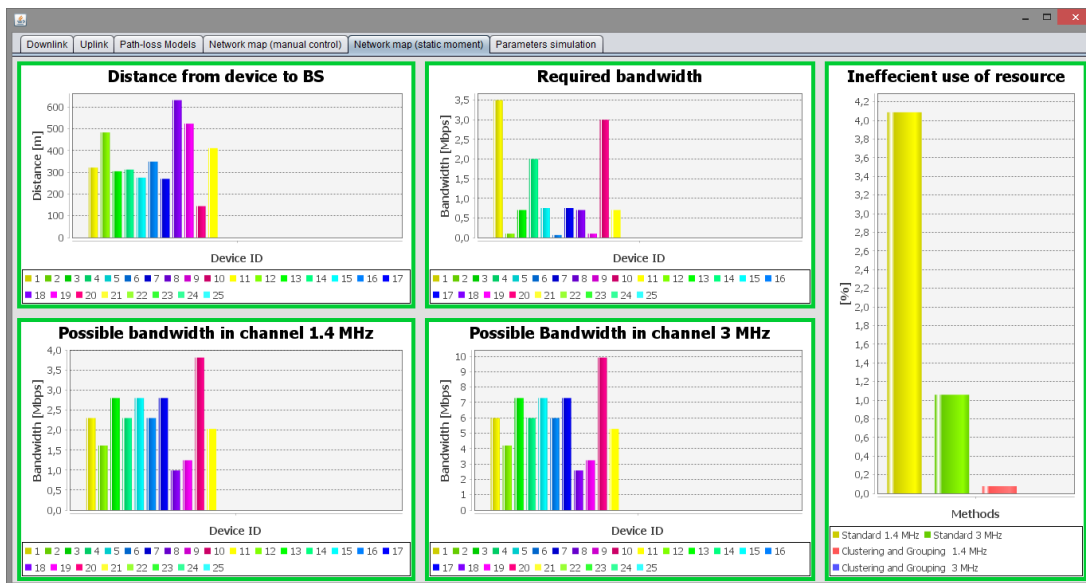


Рис. 3.36. Вимоги до пропускної здатності та неефективність використання доступних ресурсів мобільними та M2M датчиками при їх обслуговуванні класичною архітектурою LTE, доповненою мультистандартним шлюзом, з врахування детермінованих початків передавання даних

Як бачимо, при врахуванні «резервних» датчиків відсоток «простою» субкадрів зменшився.

3.3. Розробка імітаційної моделі гетерогенної мережі LTE із наданням сервісів M2M/ІоТ

Загальний вигляд і параметри моделювання. Для кількісної оцінки роботи запропонованого рішення розроблено програмну імітаційну модель. Для розробки використано середовище програмування Java. Розроблена модель імітує роботу дворівневої мережі радіодоступу. Вищим рівнем мережі радіодоступу є базові станції макрорівня. Нижчим – утворені абонентами кластери M2M пристроями та M2M шлюзи. У цьому випадку шлюзи, працюють використовуючи 2 інтерфейси: інтерфейс LTE та інтерфейс Wi-Fi. Модель показує роботу фрагмента мережі, що являє собою площу між трьома базовими станціями макрорівня в умовах щільної міської забудовлі, тому радіус базової станції макрорівня становить 1,2 км. Оскільки обмін даними в M2M кластерах забезпечується із використанням технології Wi-Fi Direct, радіус кластера становить 50 м [96, 97].

Область симуляції фрагмента мережі являє собою площу між трьома базовими станціями макрорівня, в якій M2M пристрої можуть утворювати кластери як показано на рис. 3.37.

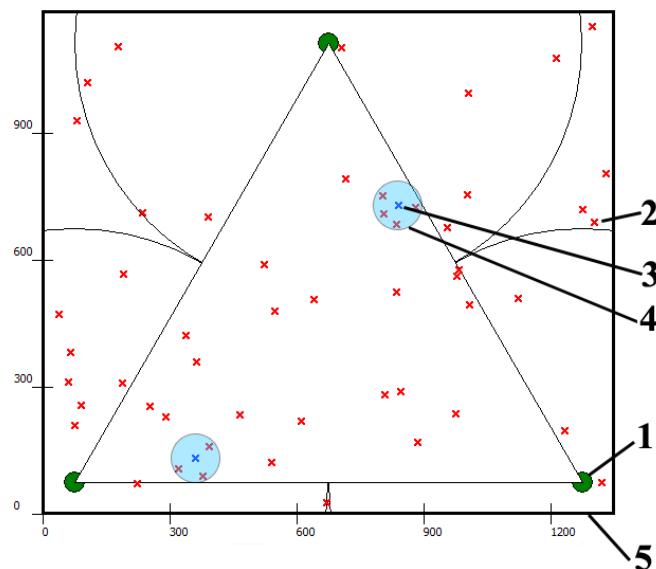


Рис. 3.37. Область симуляції фрагмента мережі: 1. Базова станція макрорівня; 2. Абонент/M2M/ІоТ пристрій; 3. Шлюз M2M; 4. Домен M2M кластерів; 5. Координатні осі (величини в метрах).

Для оцінки ефективності запропонованого методу проведено порівняння режимів роботи мережі із використанням M2M кластерів і без них. В області виведення кількісних результатів моделювання розміщено графіки, що показують зміну параметрів мережі в залежності від навантаження. На першому графіку зображується завантаженість мережі при використанні M2M – доменів Wi-Fi Direct і без них. Другий показує зміну спектральної ефективності залежно від того, чи використовується M2M домен. В області параметрів моделювання зображено основні параметри моделювання, а саме: кількість базових станцій, частотний діапазон на кожен станцію, режим MIMO, вид і порядок модуляції та середню кількість абонентів. Всі параметри моделювання наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Параметри моделювання

Радіус макрокомірки	1200 м
Кількість макрокомірок	3
Частотний діапазон що доступний макрокоміркам	60 МГц
Режим MIMO	4x4
Радіус M2M домену	50 м
Вид модуляції DL (в каналі LTE)	64 QAM
Вид модуляції UL	16 QAM
Зміна параметрів абонентів	Кожної ітерації з імовірністю 0,1
Генерація абонентського навантаження	Згідно нормального закону розподілу, послуги відповідно QCI
Смуга пропускання каналу LTE	1.4; 3; 5; 10; 15; 20 МГц (в залежності від послуги)
Генерація кількості абонентів	Згідно нормального параметричного закону розподілу
Середня кількість абонентів	120

Моделювання руху абонентів. Моделювання проведено в умовах густонаселеного району протягом 12 годин. Як відомо, із збільшенням мобільності абонента його вимоги до трафіку мають тенденцію спадати, тому більшість абонентів та IoT є малорухомими, а домени M2M пристроїв є нерухомими. Також враховано, що є невелика частина рухомих абонентів, які завантажують базову станцію.

Кожен абонент та M2M/ІоТ пристрій має наступні атрибути:

- Параметри мобільності: швидкість і напрям руху.
- Атрибут, що визначає належність до M2M кластеру та чи є пристрій/абонент головним вузлом.

– Параметри якості обслуговування: необхідна швидкість і затримка (відповідно до QoS, пріоритет).

Алгоритм вибору головного вузла опирається на наступні умови:

– Якість каналу зв'язку Wi-Fi (на основі виміряного значення сигнал/шум) [98,99].

– Параметр мобільності – для набуття статусу головного вузла абонент/M2M пристрій повинен бути нерухомим або малорухомим протягом деякого мінімального проміжку часу.

– Рівень батареї.

Генерування абонентського навантаження. Оскільки генерація абонентського навантаження із параметрами, близькими до реальних є досить складною, в розробленій моделі для спрощення навантаження генерується за нормальним законом розподілу.

Генерування абонентського навантаження

Оскільки генерація абонентського навантаження із параметрами, близькими до реальних є досить складною, в розробленій моделі для спрощення навантаження генерується за нормальним законом розподілу і вибирається з множини сервісів QoS:

- Відео дзвінки (5 Мбіт/с).
- Онлайн ігри (10 Мбіт/с).
- Поточкове відео (10 Мбіт/с).
- M2M дані (0.56-1 Мбіт/с).
- Телефонні дзвінки (64 Кбіт/с).
- Відео на замовлення (1-10 Мбіт/с).
- ІоТ сервіси для NB-IoT (128 Кбіт/с).

Також враховано, що мінімальне навантаження від абонента відповідає стану бездіяльності (не генерується ніякого навантаження). Необхідно зазначити, що параметри абонентів не є сталими в часі і можуть змінюватись з імовірністю 0.1 кожної ітерації циклу. Також слід зазначити, що найбільш імовірний згенерований трафік припадає на стан бездіяльності, голосові дзвінки і передачу даних. Також в моделі розраховано зміну спектральної ефективності від впровадження M2M доменів. Агрегація службових каналів передбачає, що службових каналів LTE такий як фізичний канал управління DL (PDCCH). Фізичний канал управління UL (PUCCH), об'єднуються в один спільний канал на рівні нововведеного в архітектуру LTE M2M шлюза, тому немає необхідності надання цих каналів кожному пристрою окремо. Кількісна міра економії частотного ресурсу за рахунок агрегації залежить від кількості пристроїв в кластері та послуг, які надаються. В загальному випадку заощаджений частотний ресурс буде обраховуватись наступним чином:

$$F_{AG} = \sum_{i=0}^i \Delta F_{sig}, \quad (3.8)$$

де F_{AG} - збережена частотна смуга кластера; ΔF_{sig} – смуга пропускання вище згаданих сигнальних каналів; i – індекс домену кластера.

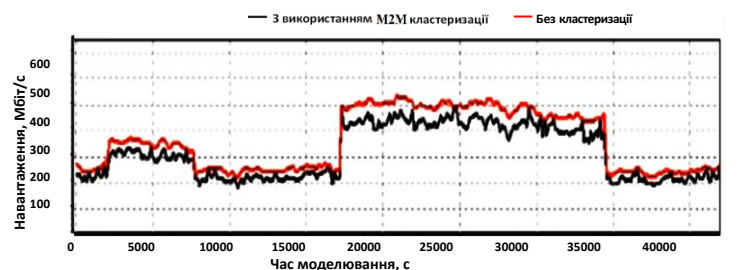
3.4. Дослідження спектральної ефективності та параметрів QoS в межах архітектури LTE з використанням імітаційного моделювання

Моделювання проводиться відповідно до сценарію 12-годинного робочого дня:

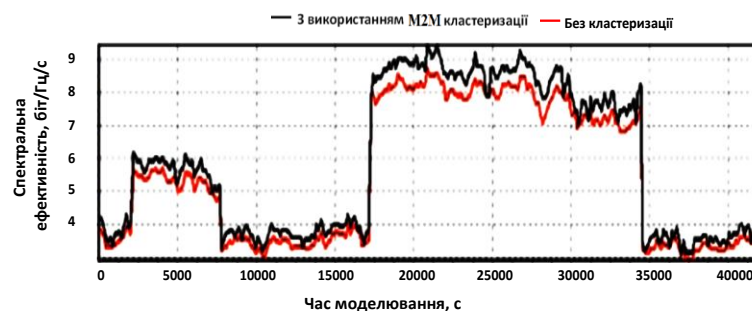
- Навантаження мінімальне.
- Зростання навантаження.
- Година найбільшого навантаження.
- Спад навантаження.

В результаті моделювання отримано наступні графіки: навантаження на мережу з використанням кластеризації і без неї (рис. 3.38а) та спектральну

ефективність (рис. 3.38 б). На рис. 3.38 а) червона крива показує загальну завантаженість мережі без використання M2M доменів. Чорна крива зображує завантаженість мережі з використанням кластеризації. Різниця між цими кривими показує розвантаження мережі за рахунок агрегації даних. На рис. 3.38 б) видно зміну спектральної ефективності: червона лінія вказує на те, що кластеризація не застосована, а чорна, що застосована. Загалом спектральна ефективність збільшується за рахунок 2 факторів: суміжного трафіку та агрегації службових каналів.



а)



б)

Рис. 3.38. Навантаження на мережу за випадку кластеризації та без неї (а) та системна спектральна ефективність (б) [86]

Розглянемо детальніше роботу моделі в ключових точках 1 і 2. Точка номер 1 відповідає малому навантаженню і припадає на момент 10 000 с. точка номер 2 лежить в межах години найбільшого навантаження і припадає на момент 30 000 с. Як бачимо, кількість M2M доменів прямо пропорційна навантаженню на мережу і спектральній ефективності каналу між шлюзом і базовою станцією.

В точці номер 1 (рис. 3.39 а) кількість М2М кластерів становить 4, відповідно навантаження, що обслуговується є невеликим, а спектральна ефективність становить 4 біт/Гц/с. Розглянемо структуру мережі для точки 2 (рис. 3.39 б). Як бачимо, при збільшенні навантаження на мережу кількість М2М кластерів зростає до 11, відповідно зростає спектральна ефективність до 10 біт/Гц/с.

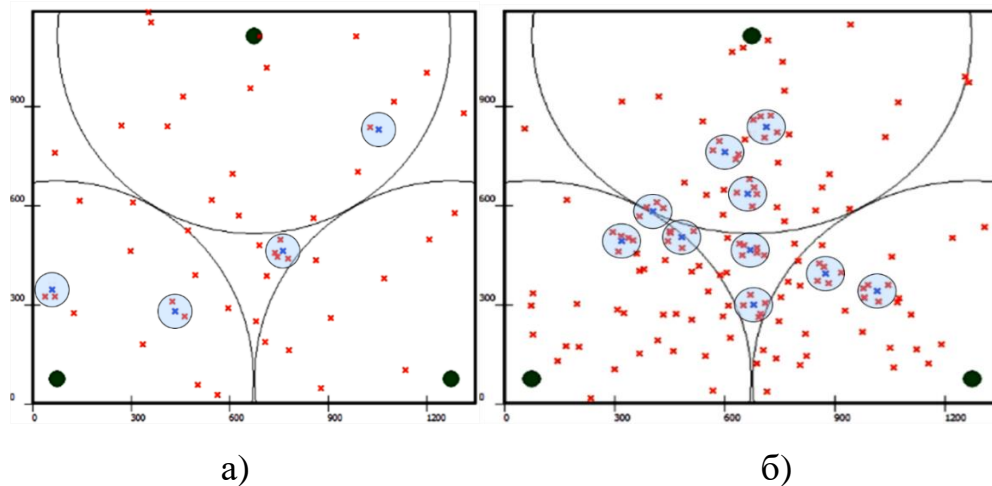


Рис. 3.39. Структура мережі при малому (а) навантаженні та в ГНН (б)[86]

На рис. 3.40 а) продемонстровано обслуговування М2М пристроїв за умови неврахування диференціації трафіку на класи. У цьому випадку базова станція виділяє ресурси пристроям не враховуючи можливість відтермінування передавання даних до максимально допустимого часу. При цьому частині пристроїв, що передають трафік реального часу виділяються ресурси неоптимально і виникає ситуація коли не забезпечується затримка обслуговування E2E QoS (t). На рис. 3.40 б) пропонуємо перевагу обслуговування М2М пристроїв при використанні методу управління інформаційними потоками та розподілу ресурсів гетерогенної мережі 4G/5G для надання сервісів М2М/ІоТ. Перевага полягає в гарантованому обслуговуванні трафіку реального часу, яка досягається шляхом переспрямування даних до черг нижчого пріоритету та відтермінування

обслуговування трафіку, що знаходяться в ній в межах максимально допустимого часу.

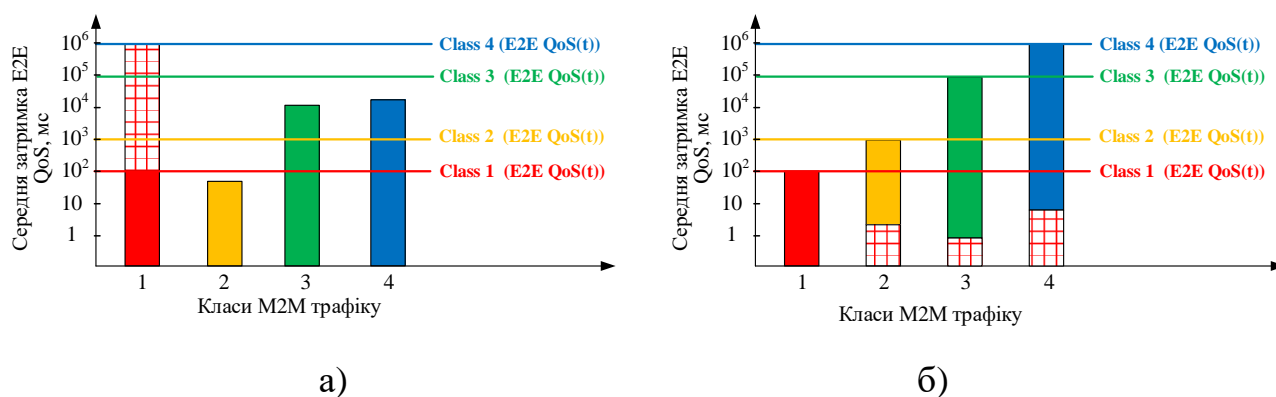


Рис. 3.40. Середня затримка обслуговування з кінця в кінець M2M трафіку із запропонованим рішенням а) та без запропонованого рішення б) [86]

При застосуванні запропонованого рішення зростає ефективність використання мережевих ресурсів. Зокрема, зменшується частка сигналізаційних даних при ширині каналу 1,4, 3, 5, 10, 15, 20 МГц. Частка сигналізаційних даних зменшилася приблизно на 10%, що продемонстровано на рис. 3.41.

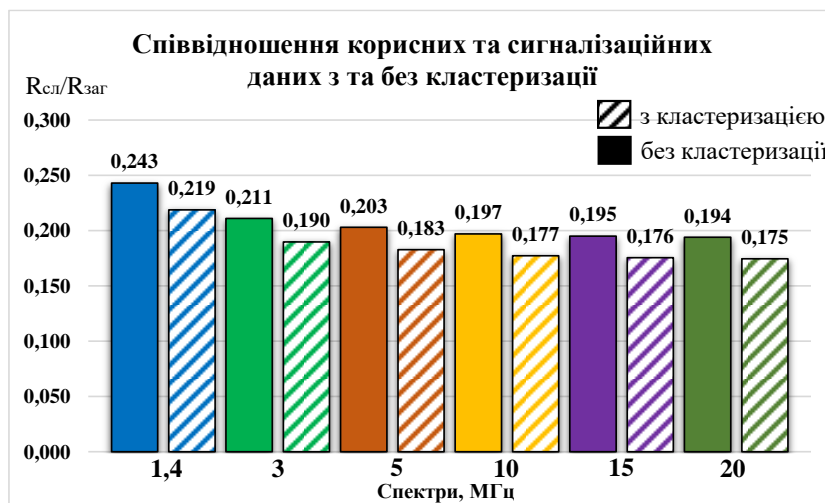


Рис. 3.41. Підвищення використання ресурсів за рахунок зменшення кількості сигналізаційних даних для вищезгаданого сценарію моделювання [86]

Отже, застосування M2M дозволяє розвантажити мережу в умовах високого рівня завантаженості. Розвантаження мережі відбувається за рахунок

двох основних факторів: суміжного трафіку та зменшення необхідної смуги пропускання за рахунок агрегації службових каналів керівником групи. Тому можемо зробити висновок, що застосування технології M2M Wi-Fi Direct на мережах мобільного зв'язку дозволяє розвантажити мережу в середньому на 10%, а також збільшити середнє значення спектральної ефективності на 6 % за рахунок агрегації сигнальної інформації та оптимального розподілу ресурсів каналів.

На основі розробленої імітаційної моделі гетерогенної мережі LTE/NB-IoT встановлено, що використання пріоритезації IoT трафіку в процесі планування частотно-часових ресурсів у вузькосмуговому спектрі NB-IoT, дає змогу зменшити середню затримку передавання повідомлень реального часу до 2,12 разів у порівнянні з існуючим методом пропорційного розподілу ресурсів в умовах високого навантаження

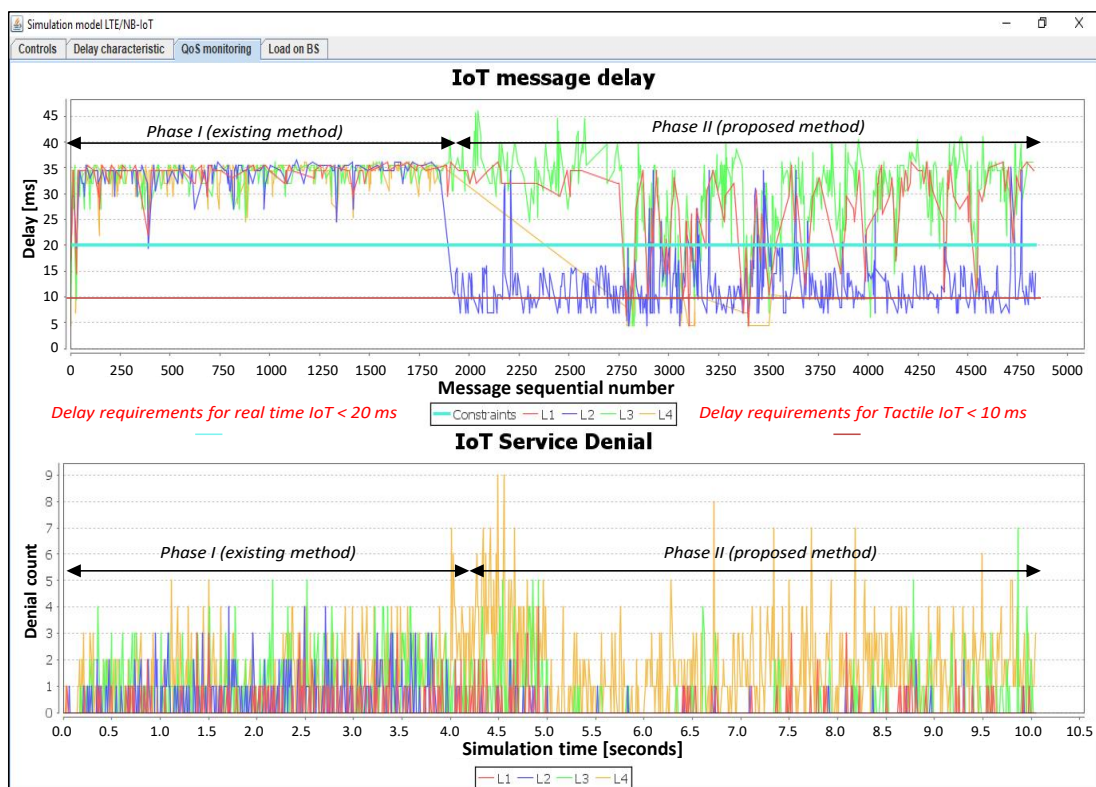


Рис. 3.42. Поточна затримка та відмови в обслуговуванні при обслуговуванні запитів від пристроїв IoT

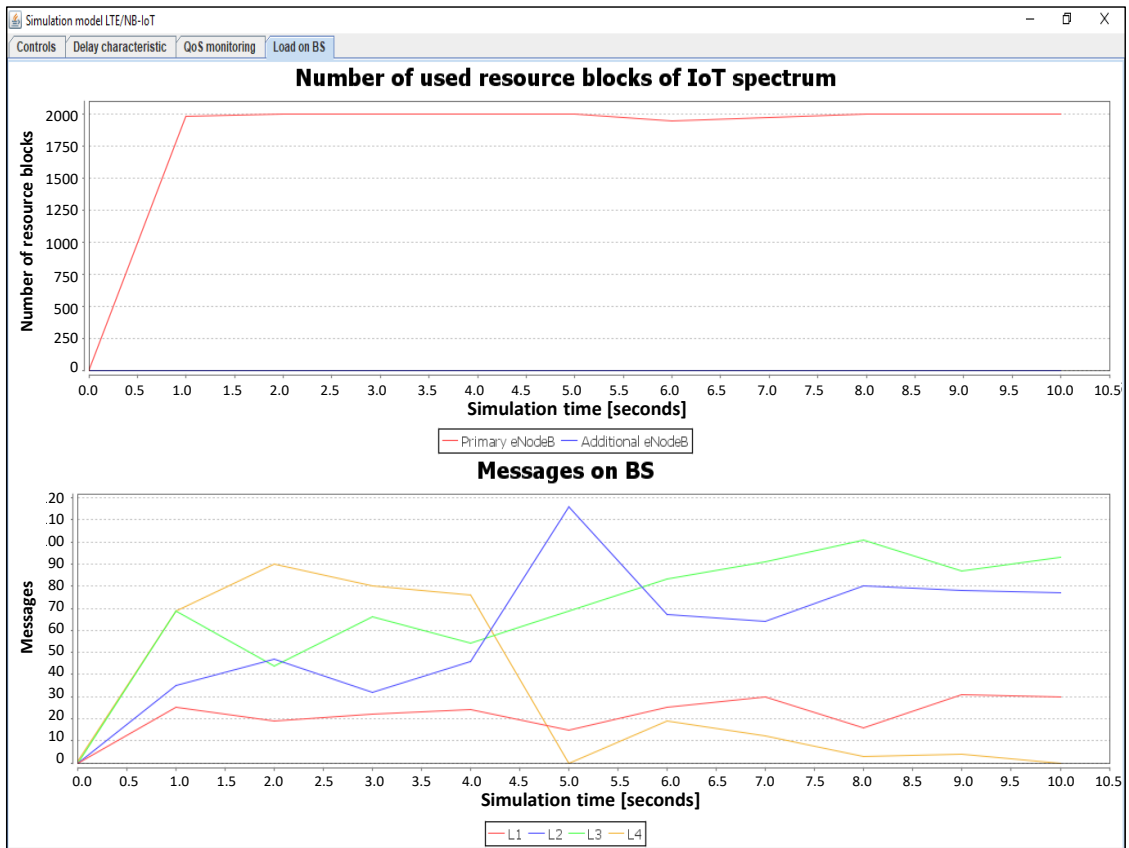


Рис. 3.43. Використані блоки ресурсів спектру IoT та співвідношення переданих повідомлень з різними пріоритетами [88]

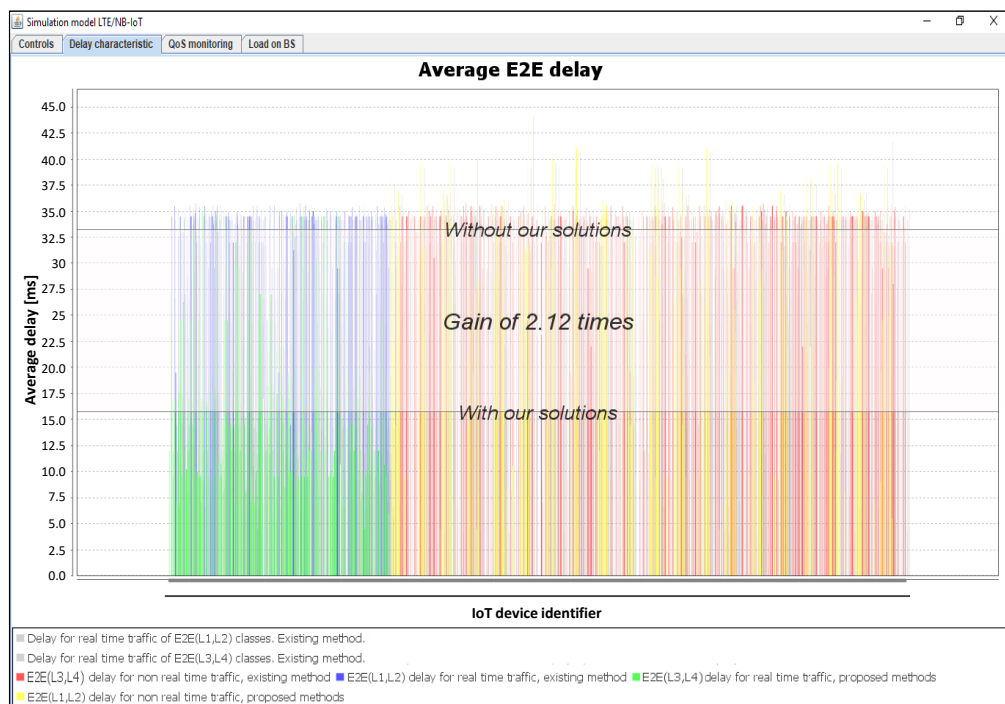


Рис. 3.44. Середня затримка E2E послуг IoT з нашим рішенням [88]

3.5. Висновок до розділу 3

У третьому розділі проведено аналітичне дослідження запропонованого методу розподілу радіоресурсів LTE мережі та наголошено на особливостях резервування субкадрів в різних смугах. Показано ефективність запропонованого методу планування субкадрів при передаванні малих за об'ємом даних M2M датчиками, виведено узагальнюючу схему обслуговування мобільних користувачів та M2M датчиків. Описано імітаційну модель, що реалізує запропоновані рішення з її допомогою показано можливість дослідження мобільності абонентів гетерогенної мобільної мережі 4G/5G, 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. Також показано спосіб зменшення відсотка простою субкадрів при резервуванні ресурсів під дані від M2M шлюза. Згідно результатів роботи імітаційної моделі можна побачити, що запропоноване рішення виправдане. Виграш по кількості обслужених M2M пристроїв і результати резервування субкадрів в межах кадру згідно запропонованої методу вибору ширини каналу показують очевидну перевагу запропонованого комплексного методу управління інформаційними потоками та мережевими ресурсами. Виграш по кількості обслужених мобільних пристроїв та M2M датчиків максимальний при передаванні останніх малих за обсягом даних. При такому розкладі, ефективність кластеризації датчиків, агрегації пріоритезованих потоків даних від них з врахуванням умови гарантованого обслуговування M2M шлюзом даних досягає свого піку.

Також, в ході проведеного імітаційного дослідження підтверджено, що при застосування технології Wi-Fi Direct як основи для M2M взаємодії пристроїв, мобільна мережа розвантажується в середньому на 10 %. При цьому звільненні ресурси базова станція може використати для підвищення якості обслуговування мобільних користувачів та M2M/IoT пристроїв.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНИХ ПІДХОДІВ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ УПРАВЛІННЯ ТРАФІКОМ ТА РОЗПОДІЛОМ РЕСУРСІВ У ПЕРСПЕКТИВНИХ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

4.1. Концептуальна модель програмно-конфігурованої мережі мобільного зв'язку з наскрізним адаптивним управлінням ресурсами та інформаційними потоками

У роботі пропонується підхід щодо побудови концептуальної моделі 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/ІоТ пристроїв з метою гарантування наскрізної якості обслуговування в умовах тимчасової нестачі спектральних ресурсів та нестабільності радіоканалу.

Дана модель базується на використанні вище запропонованого методу стосовно оптимального розподілу радіоресурсів. Проте, потреба у розробленні такої моделі полягає у тому, що запропоновані рішення у вищезгаданих розділах стосуються лише розподілу ресурсів на рівні базової станції так званому каналному рівні з метою раціонального використання ресурсів для забезпечення якості обслуговування в межах архітектури LTE. Насправді гарантування якості обслуговування з кінця в кінець є складним завданням для операторів мобільного зв'язку, оскільки вихід пакетних даних за межі рівня LTE ядра мережі, а саме у рівень зовнішніх IP-орієнтованих мереж не забезпечує жодних гарантій щодо якості обслуговування, це пов'язано з тим що політика управління інформаційними потоками в вузлах мережі (маршрутизатори) базується на окремих методах забезпечення QoS, до яких оператор мобільного зв'язку немає жодного впливу.

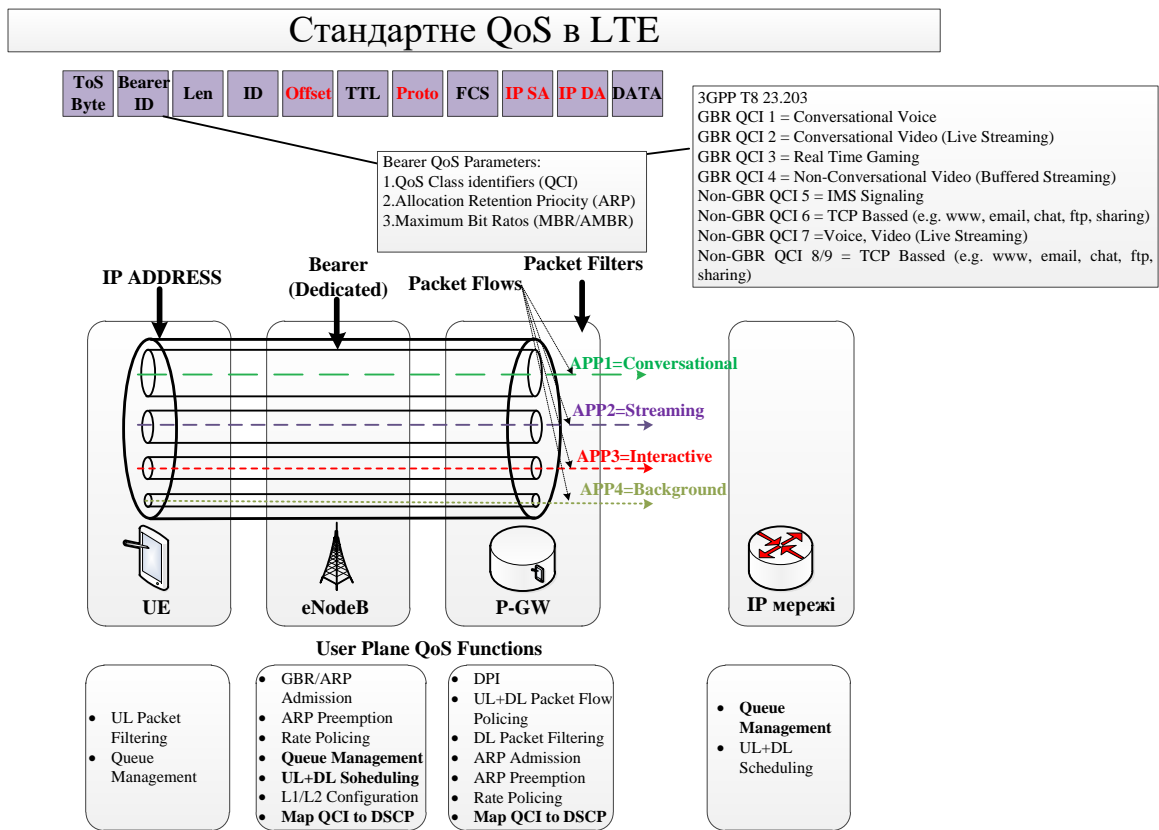


Рис. 4.1. Існуюча модель мережі LTE управління ресурсами та якістю обслуговування щодо гарантування E2E QoS [100]

У ядрі мережі LTE якість обслуговування в потоках EPS контролюється за допомогою таких параметрів QoS [100]:

1. Тип виділеного ресурсу: з гарантованою швидкістю передачі даних (GBR) або з негарантованою швидкістю передачі (Non-GBR);
2. Параметри QoS:
 - QCI (QoS Class Identifier) - ідентифікатор класу якості обслуговування.
 - ARP (Allocation and Retention Priority) - пріоритетність призначення і утримання каналів.
 - GBR (Minimum Guaranteed Bit Rate) - гарантована швидкість передачі.
 - MBR (Maximum Bit Rate) - максимальна швидкість передачі.
 - APN-AMBR (Access Point Name Aggregate Maximum Bit Rate) - загальна максимальна швидкість передачі для однієї точки доступу.

– UE-AMBR (User Equipment Aggregate Maximum Bit Rate) - загальна максимальна швидкість передачі для одного користувацького обладнання. Для кожного віртуального з'єднання повинні бути визначені такі параметри, як ідентифікатор класу якості обслуговування (QCI) і пріоритетність призначення і утримання каналів (ARP). Параметр QCI є дуже важливим, оскільки служить довідковою інформацією у визначенні рівня QoS для кожного наскрізного каналу EPS. У разі смуги пропускання (бітрейта) GBR і MBR визначаються тільки в потоках EPS з гарантованою швидкістю передачі даних, тоді як AMBR (APN-AMBR і UE-AMBR) визначаються тільки в потоках EPS з негарантованою швидкістю. Нижче ми пояснимо окремо кожен з параметрів QoS в LTE-мережі.

Тип ресурсу GBR (з гарантованою швидкістю передачі даних):

Наявність типу ресурсу GBR в віртуальному з'єднанні EPS означає, що пропускна здатність каналу зв'язку гарантована. Очевидно, GBR-тип потоку EPS має пов'язану гарантовану швидкість даних (що буде пояснено нижче) як один з параметрів QoS.

Тільки виділений тип віртуальних з'єднань може бути GBR-поток, а тип EPS за замовчуванням ним не може бути. Ідентифікатор QoS EPS-поток з гарантією швидкості передачі даних може знаходитися в діапазоні від 1 до 4.

Тип ресурсу Non-GBR (з негарантованою швидкістю передачі даних):

Для віртуального з'єднання EPS тип non-GBR означає виділення ресурсів за принципом «краще з можливого» (best effort), а пропускна здатність з'єднання не гарантовано. Віртуальне з'єднання за замовчуванням завжди є потоком з негарантованою швидкістю передачі, в той час як виділене віртуальне з'єднання може бути як потоком з гарантованою, так і з негарантованою швидкістю передачі. Ідентифікатор QoS EPS-поток без гарантованої швидкості передачі даних може знаходитися в діапазоні від 5 до 9.

Параметр QCI, ціле число від 1 до 9, вказує на 9 різних робочих характеристик QoS кожного IP-пакета. Значення QCI є стандартизованими для

окремих вихідних характеристик QoS, і кожен QCI містить такі стандартні робочі характеристики (значення):

Якість обслуговування, що гарантується для наскрізного каналу EPS або логічного потоку даних, змінюється в залежності від зазначених значень QCI. Параметр QCI, хоча це ціле число, являє собою специфічні вузлові параметри, які надають деталі щодо того, як вузол LTE управляє пересилкою пакетів (наприклад, параметрами зваженого планування, вхідними порогами, порогами черги, конфігурацією протоколу канального рівня і т.д.)

Визначаючи заздалегідь робочі характеристики кожного значення QCI і стандартизуючи їх, оператори мережі можуть гарантувати, що такий же мінімальний рівень QoS, який потрібно стандартами LTE, надається різним службам/додатків. Ці служби і додатки використовуються в мережі LTE, яка складається з різних вузлів. Значення QCI цілком ймовірно використовуються в основному eNB (базовими станціями мережі стандарту LTE) для контролю пріоритету пакетів, переданих через радіоканали.

ARP розглядається тільки при прийнятті рішення, чи потрібно створювати новий наскрізний канал EPS чи ні. Після створення нового каналу і передачі через нього пакетів ARP не впливає на пріоритет отриманого пакета і, таким чином, мережевий вузол пересилає пакети незалежно від їх значень ARP.

GBR (UL/DL) цей параметр використовується для віртуального з'єднання типу GBR і визначає ширину смуги пропускання (швидкість передачі даних в бітах), гарантовану LTE-мережею. Він не використовується для non-GBR потоку з негарантованою пропускнуою здатністю (UL для трафіку висхідної лінії зв'язку і DL для низхідної лінії зв'язку).

MBR (UL/DL) MBR використовується для потоку типу GBR і визначає максимальну бітову швидкість передачі даних, яка дозволена в LTE-мережі. Будь-які пакети, які надходять в наскрізний канал, відкидаються після того як зазначена швидкість MBR стає перевищеною.

Одним із найбільш популярних в зовнішніх IP-орієнтованих мережах є використання на практиці механізмів диференційованого обслуговування

DiffServ. DiffServ архітектура передбачає наявність класифікаторів і формувачів трафіку на кордоні мережі, а також підтримує функцію виділення ресурсів в ядрі мережі для забезпечення необхідної покрокової політики обслуговування (Per-Hop Behavior - PHB). DiffServ розділяє трафік на класи шляхом введення декількох рівнів QoS. Масштабованість архітектури DiffServ реалізується шляхом об'єднання класифікаційних ознак трафіку, при цьому інформація про тип трафіку передається в заголовок пакета IP. При цьому складні операції класифікації, маркування, визначення правил обслуговування та формування трафіку виконуються тільки на кордонах мережі або на хостах. Як ознаки приналежності IP-пакета до певного класу DiffServ використовує мітку, яка передається в поле пріоритету IP-пакета (ToS-байт), яке з появою стандартів DiffServ було перевизначено і названо DS-байт (DSCP).

Дуже часто в сучасних мережах мобільного зв'язку, зокрема у радіо сегменті виникає ситуація при якій виникають короточасні відмови каналу за рахунок тимчасового погіршення відношення сигнал/шум різними зовнішніми факторами, інтерференція, багатопроменеве відбиття сигналів, затухання сигналу та інші, що значно впливає на якість обслуговування, оскільки забезпечити необхідну пропускну здатність на каналному рівні шляхом виділення необхідної кількості частотно-часових ресурсів в межах кадру LTE є або фізично неможливим або ресурси використовуються іншими важливими потоками в умовах низького рівня сигнал/шум та відповідно виділення низького індекса показника якості каналу CQI (Channel Quality Indicator). Такі короточасні відмови особливо негативно впливають на потоковий трафік реального часу, який чутливий до часових параметрів якості обслуговування (затримки та джитеру), оскільки у такому випадку виникає ситуація коли за рахунок нестабільного радіоканалу появляються на мережевому рівні ефекти джитеру та затримки в процесі переходу та формуванні IP пакетів із нижнього рівня на верхній мережевий окремої частини пакетів.

Потоковий трафік виглядає як послідовність пакетів однакового розміру, рівного B біт, поступає один за одним через один і той же інтервал часу T (рис.4.2).

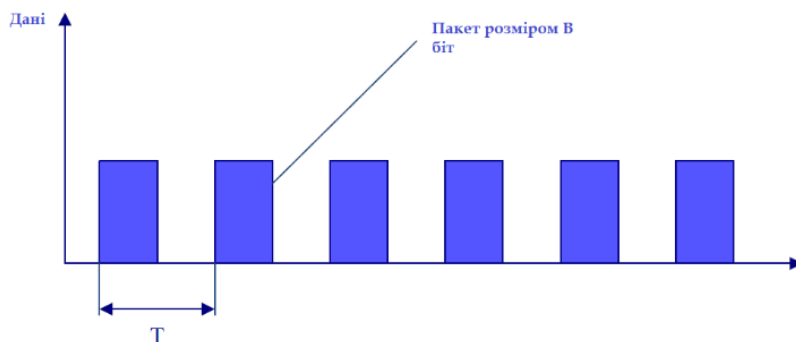


Рис. 4.2. Потоковий трафік реального часу

Середня швидкість потокового трафіку CBR може бути обчислена шляхом усереднювання на одному періоді:

$$CBR = \frac{B}{T} \text{ (біт/с)}, \quad (4.1)$$

де B – розмір одного пакету в бітах, а T – період повторення пакетів в секундах.

В наслідок короткочасних відмов в радіоканалі потоковий трафік перетворюється на пульсуючий, який характеризується високим ступенем непередбачуваності і різним інтервалом між пакетами, які можуть варіюватися в межах від 50-300 мс, у такому випадку така ситуація призводить до появи джитеру та затримки пакетів на кінцевих пунктах приймання, що у свою чергу значно перевищують допустимі вимоги якості обслуговування потокового трафіку реального часу, у яких згідно рекомендацій джитер повинен бути небільшим за 50 мс. В результаті трафік характеризується змінною бітовою швидкістю (Variable Bit Rate, VBR), що ілюструє рис.1.3.

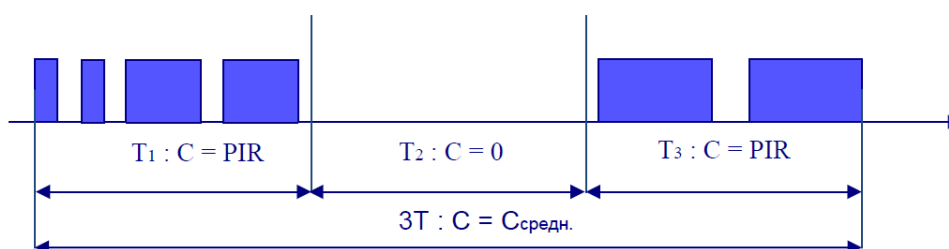


Рис. 4.3. Пульсуючий трафік

Для вирішення вище згаданого недоліку у роботі пропонується проводити узгоджене управління ресурсами та трафіком на рівні базової станції, ядра мережі та зовнішніх IP-орієнтованих мереж. Відповідно нова концептуальна модель програмно-конфігурованої мережі мобільного зв'язку з наскрізним адаптивним управлінням ресурсами та інформаційними потоками показана на рис. 4.4.

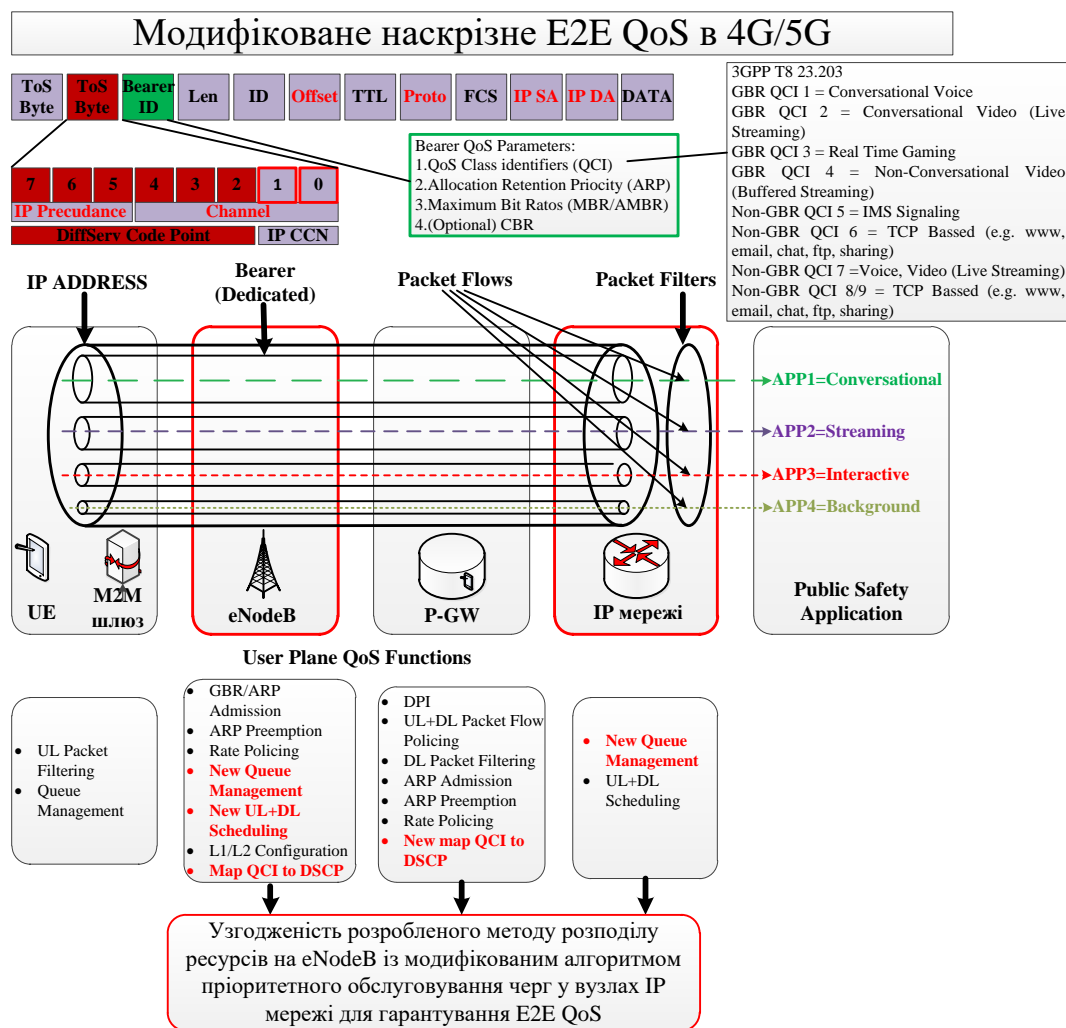


Рис.4.4. Нова концептуальна модель програмно-конфігурованої мережі мобільного зв'язку

Мається на увазі у випадку коли через нестабільності радіоканалу, на мережевому рівні виникають тимчасові затримки та джитер для певної кількості пакетів потокового трафіку реального часу. У роботі пропонується для пакетів, що зазнали негативного впливу, на мережевому рівні проводити свого

роду швидше обслуговування у вузлах мережі. За рахунок надання вищого пріоритету обслуговування пакетам, що “спізнюються” шляхом динамічної модифікації поля DSCP в заголовках пакету, шлюзом P-GW. Модель вузла IP мережі з удосконаленням алгоритму пріоритетного обслуговування пакетів показано на рис. 4.5.

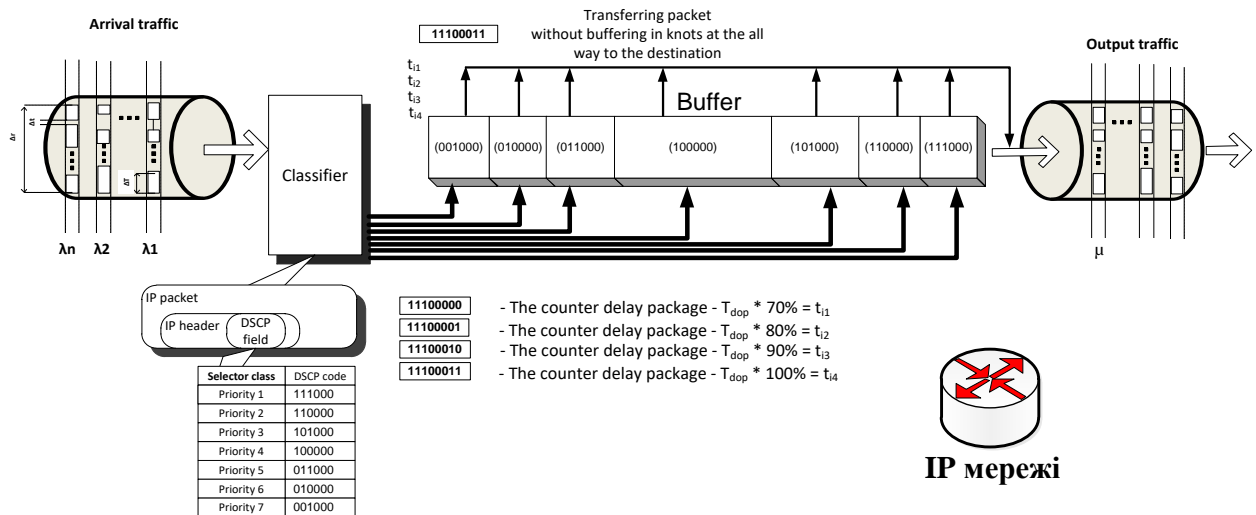


Рис. 4.5. Модель вузла IP мережі з удосконаленням алгоритму пріоритетного обслуговування пакетів [101]

Проблему виникнення високого ризику подавлення менш пріоритетних потоків потоками з найвищим пріоритетом, що також є актуальним для пакетів, що спізнюються пропонується вирішити шляхом встановлення для кожної зони пріоритетності буферного ресурсу свій допустимий лічильник часу затримки пакетів, який на основі аналізу чотирьох рівнів затримок t_1, t_2, t_3, t_4 маркуватиме пакети, шляхом встановлення двох зарезервованих (не використаних) останніх бітів у полі DSCP та обслуговуватиме їх в залежності від встановленої кодової комбінації. $t_1 = T_{доп} * 70\%$ - xxxxxx00, $t_2 = T_{доп} * 80\%$ - xxxxxx01, $t_3 = T_{доп} * 90\%$ - xxxxxx10, $t_4 = T_{доп} * 100\%$ - xxxxxx11. Таким чином, для пакетів час затримки буферизації, яких досягнув критичного рівня $t_4 = T_{доп} * 100\%$ отримує найвищий пріоритет обслуговування на всьому шляху передавання до пункту призначення (адресата) і не піддається буферизації у вузлах. З метою покращення якості

пропонується в кодї DSCP динамічно встановлювати різні комбінації шляхом заміни 4-го, 5-го, 6-го бітів з різними ймовірностями відкидання пакетів.

4.2. Оцінка ефективності функціонування удосконаленого алгоритму пріоритетного обслуговування пакетів у вузлах ІР-орієнтованих мережах

Локальні та глобальні комп'ютерні мережі є основою комунікаційної інфраструктури сучасного суспільства. Через зростання мереж проблема вибору оптимального мережевого обладнання (маршрутизаторів, комутаторів) стає все більш гострою. Центральним елементом інформаційної мережі є маршрутизатор. Основна мета якого - об'єднати підмережу, щоб будь-який комп'ютер міг обмінюватися пакетами з іншими комп'ютерами в мережі.

Маршрутизатор може бути повністю реалізований за допомогою програмного підходу (у цьому випадку це модуль операційної системи, встановлений на комп'ютері загального призначення, який виконує роль сервера). Або апаратно-програмний метод (це спеціалізований обчислювальний пристрій, в якому деякі функції виконуються нестандартним обладнанням, а деякі програмні модулі, що працюють в спеціалізованій операційній системі). Основними перевагами програмних маршрутизаторів перед апаратними є гнучкість, інтелектуальність та простота модифікації алгоритмів. На основі програмного маршрутизатора можна реалізувати найбільш нестандартні мережеві рішення. Більшість програмних маршрутизаторів працюють під управлінням Linux. Це дозволяє забезпечити високу продуктивність і гнучкість конфігурації при реалізації маршрутизації, обробки мережевого трафіку, що надходить на фізичний порт маршрутизатора. В даний час для вирішення проблем високошвидкісної маршрутизації використовуються специфічні та дорогі апаратні платформи, пропоновані іноземними постачальниками та постачальниками, які є закритими від модифікацій та надають змоги дослідити нові розробки. Однак у роботі використано власний програмний маршрутизатор [102, 103], який пройшов значну кількість апробацій (рис.4.6)

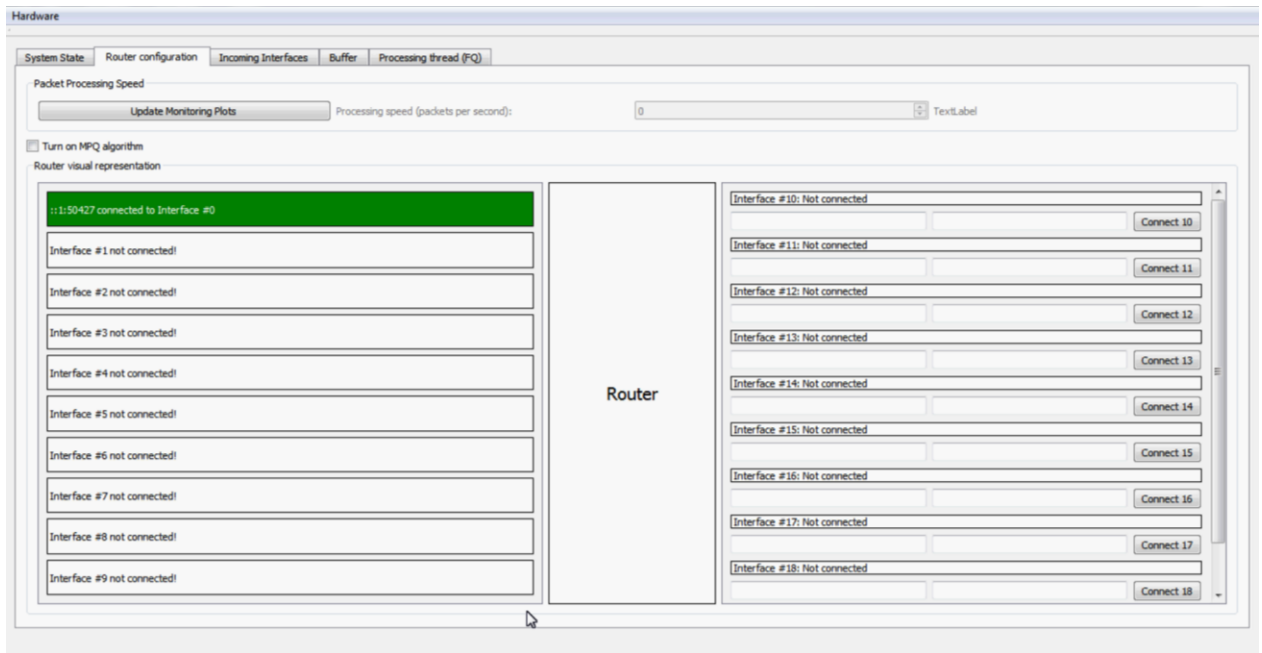


Рис. 4.6. Інтерфейс програмного маршрутизатора [102]

На основі даного програмного маршрутизатора реалізовано удосконалений алгоритм пріоритетного управління чергами, що дає змогу в умовах його використання покращити часові параметри якості обслуговування за критерієм затримки та джитеру, які з'являються зокрема за рахунок нестабільного радіоканалу LTE мережі та проявляються на мережевому рівні в сегменті зовнішньої IP-орієнтованої мережі. Зокрема, у процесі дослідження генерувався трафік потокового відео реального часу (рис.4.7).



Рис. 4.7. Трафік потокового відео



Рис. 4.8. Завантаженість маршрутизатора

В умовах високого навантаження на маршрутизатор (рис.4.8) та використання стандартного алгоритму пріоритетного обслуговування черг пакетів в системі появлялись значні затримки та джитер, що перевищували вимоги QoS, які повинні забезпечуватись для високого рівня якості сприйняття відео контенту реального часу [104], зокрема середня затримка пакетів перевищує 100 мс, а джитер 10мс. Як бачимо з результатів дослідження (рис. 4.9) перших 1800 пакетів, зазнавали погіршення якості обслуговування. Наступні пакети, які передавались обслуговувались в межах допустимих часових вимог якості за рахунок того, що використано удосконалений алгоритм пріоритетного обслуговування черг.

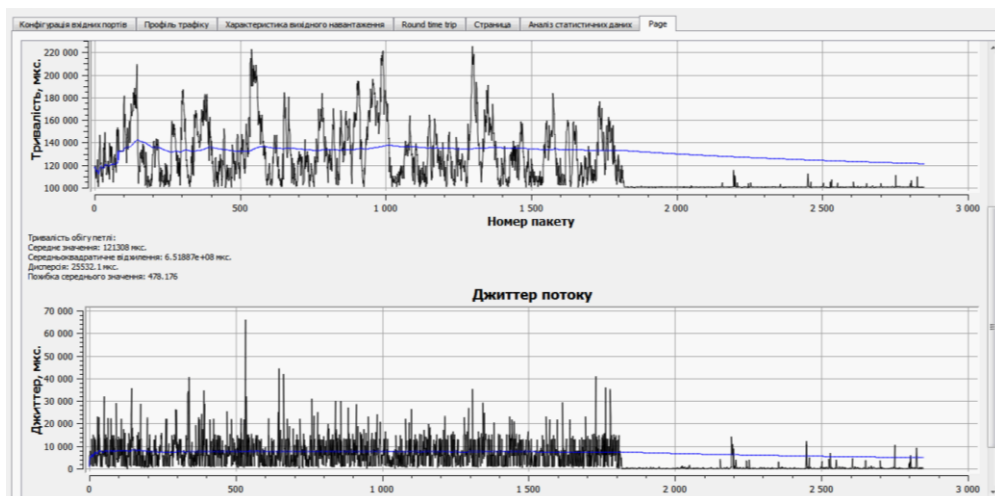


Рис. 4.9. Оцінка затримки та джитеру в умовах використання існуючого та модифікованого алгоритму пріоритетного обслуговування черг

Таким чином, удосконалення алгоритму пріоритетного обслуговування черг пакетів у вузлах зовнішніх IP-орієнтованих мережах шляхом аналізу модифікованих шлюзом P-GW заголовків пакетів поля DSCP, що вказують на критичність пріоритету пакетів щодо тривалості обслуговування в IP мережі дало змогу гарантувати часові параметри якості обслуговування потокового трафіку реального часу з кінця в кінець в умовах короткочасної нестабільності характеристик безпроводних каналів зв'язку. Зокрема у порівнянні із відомим алгоритмом пріоритетного обслуговування черг запропонований алгоритм зменшує до 30% затримку та джитер пакетів в процесі обслуговування потокового трафіку реального часу.

4.3. Науково -теоретичні підходи щодо реалізації програмно-конфігурованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі технологій SDN/NFV та SDR

Активний розвиток технологій мобільного зв'язку ставить перед виробниками апаратного забезпечення і інвесторами проблему вибору технологій (CDMA2000, UMTS/W-CDMA, EDGE, GPRS, LTE, LTE-A та ін.) для інвестування коштів. Проблема дуже складна, оскільки передбачити напрямок, в якому ринок обладнання для систем мобільного зв'язку буде розвиватися надалі, досить нелегко. Помилка в цьому випадку веде до суттєвих фінансових втрат.

«Стандартне обладнання мобільної мережі GSM/UMTS/LTE на стороні оператора» являє собою цілу стійку обладнання (а часто і не одну) з інтерфейсами, платами. Експлуатація такого обладнання – заняття складне, потребує кваліфікованих інженерів, причому, що мають досвід експлуатації різного устаткування, різних виробників.

Тому вже зараз багато дослідницьких лабораторій і виробники обладнання мобільної телефонії дивляться в бік технології Software Defined Radio (SDR) та

Software-defined Networking (SDN) та Network Functions Virtualization (NFV), як альтернативи розвитку майбутньої мобільної мережі [105].

Нова архітектура фактично означає заміну всіх типів різноманітного обладнання мобільних мереж (BSC/RNC/MSC/MSS/SGSN/GGSN/MME і т.д.) спільною платформою HW, на якій віртуалізуються всі їх функції. Якщо побудувати мережу з використанням підходів SDR і SDN/NFV, можна отримати концептуальну архітектуру з точки зору операторського обладнання (рис. 4.10).

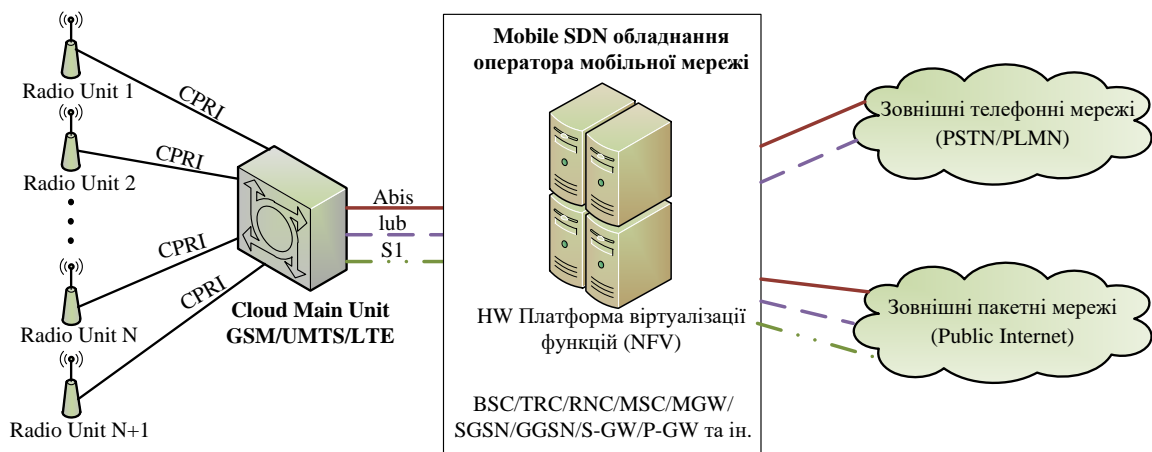


Рис. 4.10. Архітектура програмно-конфігурованої гетерогенної мобільної мережі [105]

При побудові такої мережі у роботі проведено доцільність використання технології SDR, SDN та NFV. Для подальшого ефективного розвитку і модернізації мереж мобільного зв'язку доцільно перейти до використання програмно конфігурованих радіо підсистем та мереж. Такий підхід дасть змогу вирішити проблеми модернізації, дозволяючи безперервно вдосконалювати обладнання шляхом доопрацювання тільки програмного забезпечення, при практично незмінній апаратній частині.

У гетерогенній мережі оператора запропоновано застосовувати обладнання групового доступу на базі технології SDR. При використанні SDR можна істотно спростити технічне забезпечення міжнародного роумінгу, збільшити число підтримуваних сервісів і домогтися більш високої гнучкості пристроїв

зв'язку. По-друге, з точки зору операторів мобільного зв'язку SDR - це потужний інструмент додавання додаткових сервісів і послуг. І, нарешті, по-третє, виробники абонентських терміналів і базових станцій отримують безліч переваг завдяки високій масштабованості та гнучкості рішень, можливості використання однієї і тієї ж апаратної конфігурації для реалізації безлічі різних різнотипних пристроїв. Завдяки цьому простіше досягти високої надійності рішень, а також забезпечити суттєву економію коштів на етапі як проектування і виробництва, так і на всіх етапах життєвого циклу пристрою. Під гнучкістю розуміють здатність перемикатися між каналами і змінювати тип модуляції. В результаті наявна апаратна платформа SDR може бути легко перепрограмована для підтримки будь-яких нових стандартів безпроводного обміну даними.

Під програмно-конфігурованою мережею (Software-defined Networking, SDN) розуміють мережу передачі даних, в якій рівень управління мережею відділений від пристроїв передачі даних і реалізується програмно, вона являє собою одну з форм віртуалізації обчислювальних ресурсів.

Основним елементом концепції SDN є протокол OpenFlow, який забезпечує взаємодію контролера з мережевими пристроями. На «північній» стороні контролер надає програмні інтерфейси, наявність яких дозволяє власнику мережі або стороннім розробникам створювати додатки для управління мережею. Такі програми можуть виконувати різноманітні функції в інтересах бізнес-завдань (наприклад, контролювати доступ, управляти пропускну здатністю і т. п.), причому їх розробникам не треба знати деталі функціонування конкретних мережеских пристроїв. Завдяки контролеру, вся мережа, що складається з безлічі різнотипних пристроїв різних виробників, постає для програми як один логічний комутатор [105].

Тобто, загалом впровадження технології SDN в мобільних мережах означає перегляд мережевої архітектури, відділення управління від передачі даних і автоматизацію процесу адміністрування мережевого обладнання.

У переході до програмного управління мережами окрім технології SDN ключову роль грає технологія віртуалізації мережевих функцій NFV. Ці технології доповнюють один одного в тому, що вони звертаються до різних елементів забезпечення програмно-керованого рішення. SDN збільшує гнучкість мережі за допомогою цілісного управління мережею, дозволяє швидко впроваджувати інновації і знижує експлуатаційні витрати. NFV розробляється для того, щоб оператори могли зменшити експлуатаційні витрати Capital Expenditure (CAPEX) і Operational Expenditure (OPEX) за рахунок зниження витрат на устаткування і зниження енергоспоживання.

Окрім цього, NFV також зменшує складність і робить управління мережею і розгортання нових можливостей більш легким і швидшим.

Віртуалізація мережевих функцій – це концепція мережевої архітектури, що пропонує використовувати технології віртуалізації для віртуалізації цілих класів функцій мережевих вузлів у вигляді складових елементів, які можуть бути з'єднані разом або пов'язані в ланцюжок для створення телекомунікаційних послуг (сервісів).

Взаємозв'язок з концепцією SDN полягає у тому, що загальним трендом обох технологій у галузі телекомунікацій є напрямок на віртуалізацію мережі і використання нових концепцій, в суті яких лежить програмне керування.

Найважливішою відмінністю NFV від SDN є кінцева мета концепції. Якщо в NFV планується взяти конкретні мережеві функції і реалізувати їх програмно, а потім керувати ними як програмними об'єктами, то SDN — це ідеологія роботи всієї мережі, де все управління і відповідальність за прийняття рішень (маршрутизація, комутація і т.д.) винесені на окремий централізований рівень. Тобто, NFV – це конкретні програмні компоненти, що реалізують конкретні мережеві функції, а SDN – ідеологія роботи всієї мережі і взаємодії її функціональних рівнів.

Розвиток концепції віртуалізації мережевих функцій призведе до віртуалізації функцій управління якістю, які можуть бути представлені у двох

основних функціях: управління QoS (Cloud QoS Control Function, CQCF) та управління QoS (Cloud QoS Management Function, CQMF). Функція CQCF управління QoS забезпечить контроль над потоками трафіку в мережі 5G в режимі реального часу на основі рівнів QoS, узгоджених на етапі встановлення з'єднання. Основні засоби контролю включають профілювання трафіку QoS, планування та управління потоками даних. Функція управління QoS CQMF забезпечить у мережі 5G підтримку QoS відповідно до контрактів SLA [105]. Він також здійснюватиме моніторинг, підтримку, перегляд та масштабування якості обслуговування. У роботі побудовано прототип фрагменту моделі майбутньої мережі мобільного зв'язку, заснованого на використанні технології SDN, SDR та NFV.



Рис. 4. 11. Прототип концептуальній моделі 5G-SDWN (Software Defined Wireless Network) на основі запропонованих рішень

На основі розробленого прототипу мережі у майбутній роботі пропонується реалізувати запропоновані методи управління якістю та розподілу ресурсів, що дадуть змогу забезпечити гіпотетичну наскрізну якість обслуговування за критерієм затримки в концептуальній моделі програмно-конфігурованої мобільної мережі 4G/5G (рис. 4.12).

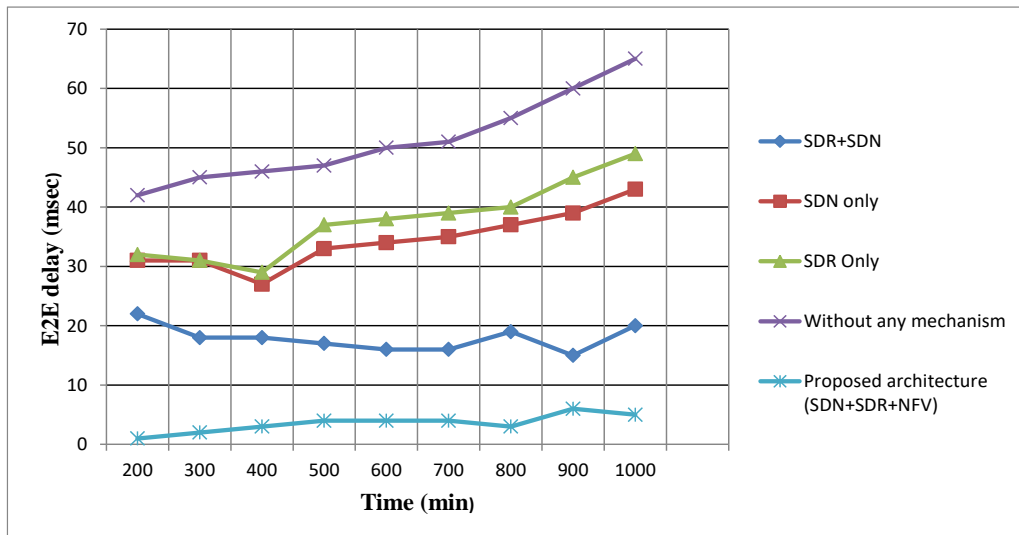


Рис.4.12. Середня затримка E2E у концептуальній моделі 5G-SDWN (Software Defined Wireless Network) [106]

Архітектура концептуальної майбутньої мережі мобільного зв'язку на основі використання технологій SDN/SDR/NFV показана на рис. 4.13.

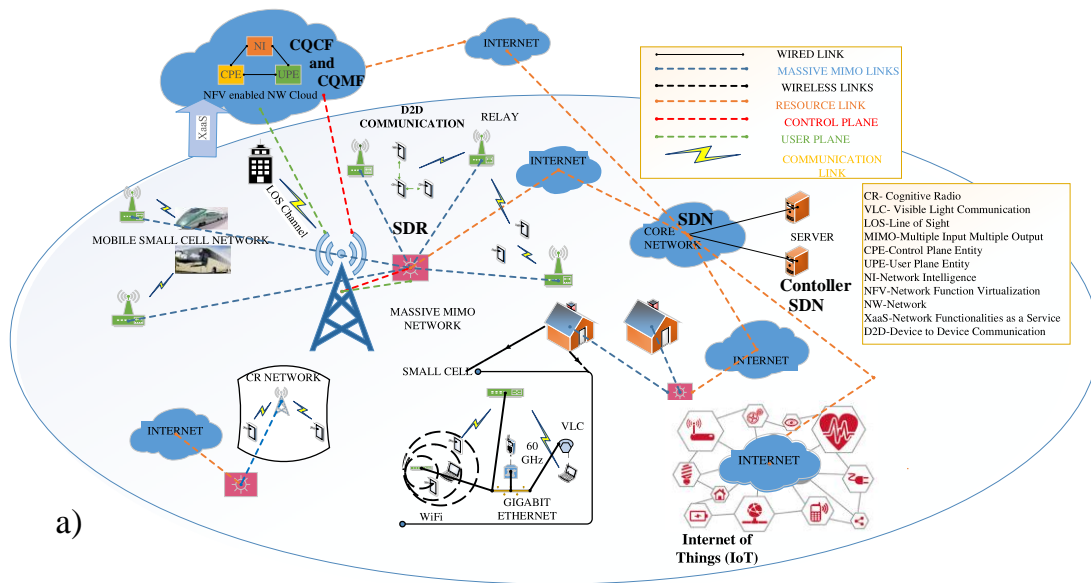


Рис.4.13. Архітектура концептуальної майбутньої мережі мобільного зв'язку на основі використання технологій SDN/SDR/NFV [106]

Інтеграція запропонованого рішення у поєднанні із технологіями SDN/SDR/NFV мережі операторів дасть змогу:

– значно поліпшити покриття мобільних мереж доступу і їх пропускну здатність за рахунок впровадження гетерогенної безпроводної мережі доступу 5G;

– покращити якість надання послуг мобільного зв'язку;
– віртуалізувати мережеву інфраструктуру [107, 108];
– впровадити балансування навантаження на мережі доступу за рахунок алгоритму хендоверу.

Всі вище згадані чинники дадуть змогу більш ефективно використовувати мережеве обладнання та ресурси мережі, а отже зменшити капітальні та операційні витрати, а також залучити більшу кількість абонентів за рахунок впровадження нових сервісів, а отже і збільшити прибутки операторів.

Економічний ефект від впровадження отриманих рішень матимуть також виробники і постачальники апаратного і програмного забезпечення мереж, і абонентських пристроїв, оскільки зможуть на базі запропонованого розробити апаратні або програмні стандартизаційні рішення.

4.3.1. Дослідження процесу організації наскрізного гарантування пропускну здатності фізичного каналу в концептуальній мережі мобільного зв'язку для забезпечення QoS

При впровадженні нових телекомунікаційних технологій і запуском мобільних мереж 4G/5G важливим є завданням забезпечення необхідної пропускну здатності каналу з кінця в кінець для певних типів сервісу з метою забезпечення гарантованої якості обслуговування.

Розглянемо ресурси каналу, як провідного так і безпроводного з пропускну здатністю C_{Σ} (у нашому випадку для простоти розуміння приймемо 100 Мбіт/с), які є обмеженими. Для створення нових механізмів управління ресурсами пропускну здатністю і каналу необхідно проаналізувати існуючі методи розподілу [109]. Отже, у фізичному каналі організовано декілька логічних (розглянемо три логічних (віртуальних)) канали,

виділені для певних користувачів зі статично заданими пропускними здатностями (рис. 4.14) C_1 і C_n від загального ресурсу C_Σ , при чому значення $C_1=C_2=C_n=C_\Sigma/n$, отже за звичайного доступу N -ю кількістю користувачів певним трафікам виділяється пропускна здатність

$$C_{1,2,n} = \frac{C_\Sigma}{N}, \quad (4.2)$$

причому $C_\Sigma = C_1+C_2+C_3$ (див. рис. 4.14).

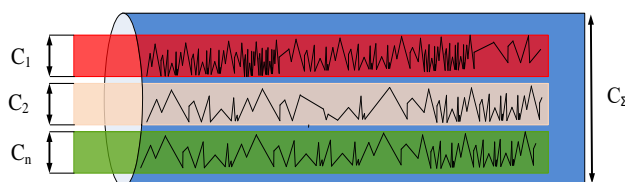


Рис. 4.14. Статичний розподіл пропускної здатності фізичного каналу між трьома логічними

У першому з них передається інформація реального часу, чутлива до затримок і втрат (для систем відеоконференцзв'язку), в другому і третьому – другорядна інформація (дані, WEB, FTP та інформація, яка не чутлива до затримок і втрат). Виникає завдання найбільш ефективного способу розділення загальної пропускної здатності C_Σ фізичного каналу між трьома логічними. Оскільки в першому віртуальному каналі передається критична до втрат інформація, необхідно збільшувати пропускну здатність C_1 цього каналу. Однак, при цьому зменшується ефективність його використання і доступна пропускна здатність для другого каналу (рис.4.15). В результаті ресурси фізичного каналу витрачаються неефективно.

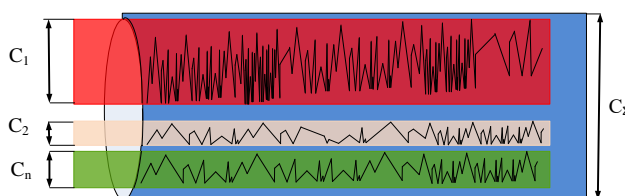


Рис. 4.15. Динамічний розподіл пропускної здатності каналу між трьома логічними

$$C_1 = C_\Sigma - C_{n-1} - C_n, \quad (4.3)$$

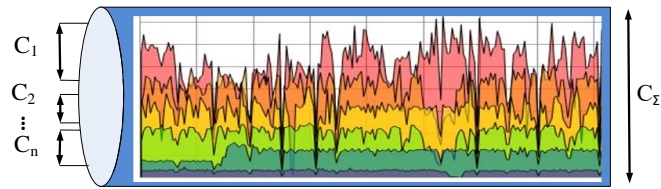


Рис. 4.16. Динамічний розподіл пропускної здатності фізичного каналу між декількома логічними в певний момент часу

$$C_{[1,t]} = C_{\Sigma} - C_{[n-1,t]} - C_{[n,t]} \cdot \quad (4.4)$$

Набагато більші можливості в цьому випадку може запропонувати схема з динамічним управлінням пропускною здатністю каналу з наданням необхідних мережевих ресурсів з метою забезпечення якості обслуговування в мобільних мережах нового покоління мережі (рис. 4.16).

Отже, при динамічному розподілі пропускної здатності до настання моменту часу t система виділяє для першого сервісу необхідний ресурс пропускної здатності для забезпечення QoS, розподіливши при цьому другому і третьому каналу всю решту доступну пропускну здатність. Як можна бачити з рис. 4.16, принцип динамічного управління пропускною здатністю в даному прикладі збільшує ефективність використання пропускної здатності в першому каналі і надає більше ресурсів для другого і третього каналів.

Блок-схему алгоритму імітаційної моделі динамічного розподілу та резервування пропускної здатності фізичного каналу між декількома логічними в певний момент часу для надання інфокомунікаційних послуг наведено на рис.4.17. [108].

Відбувається ініціалізація констант та масивів, i – кількість сервісів мультисервісної мережі [6], $i=6$ (IPTV, VoIP, VoD, WEB, Відеоконференція, Cloud послуги); необхідна пропускну здатність каналу для забезпечення якісного надання послуг мобільним абонентам $C_i, C_1(IPTV) = 10\text{Мбіт}/\text{с}, C_2(\text{VoIP}) = 128\text{Кбіт}/\text{с}, C_3(\text{VoD}) = 4\text{Мбіт}/\text{с}, C_4(\text{WEB}) = 0.512\text{Мбіт}/\text{с}, C_6(\text{Cloud}) = 12\text{Мбіт}/\text{с}, C_5(\text{Відеоконференція}) = 2\text{Мбіт}/\text{с}$, Оголошення змінних: тривалості моделювання i -го сервісу T_{modi} ; N_i – кількість трансляцій сервісу протягом часу моделювання для кожної із послуг; k – порядковий номер трансляції сервісу; оголошення

масивів: моментів початків викликів i -го сервісу T_{poch_i} ; моментів кінців викликів i -го сервісу $T_{kin_{ik}} = T_{poch_{ki}} + T_{truv_{ik}}$; тривалостей трансляцій сеансів сервісу $T_{truv_{ik}}$, згенерованих випадковим чином з нормальним законом розподілу; загальні двовимірні масиви початків та кінців викликів із виділенням необхідної пропускної здатності для сервісу: $ZagTepoch = \{\{\}\}$; $ZagTkin = \{\{\}\}$; пропускних здатностей сервісу: $IPTV = \{\}$; $VoIP = \{\}$; $VoD = \{\}$; $WEB = \{\}$; $Cloud = \{\}$; $Vidconf = \{\}$; $Vidconf = \{\}$; масиву кількості сеансів сервісу $VUKL = \{\}$;

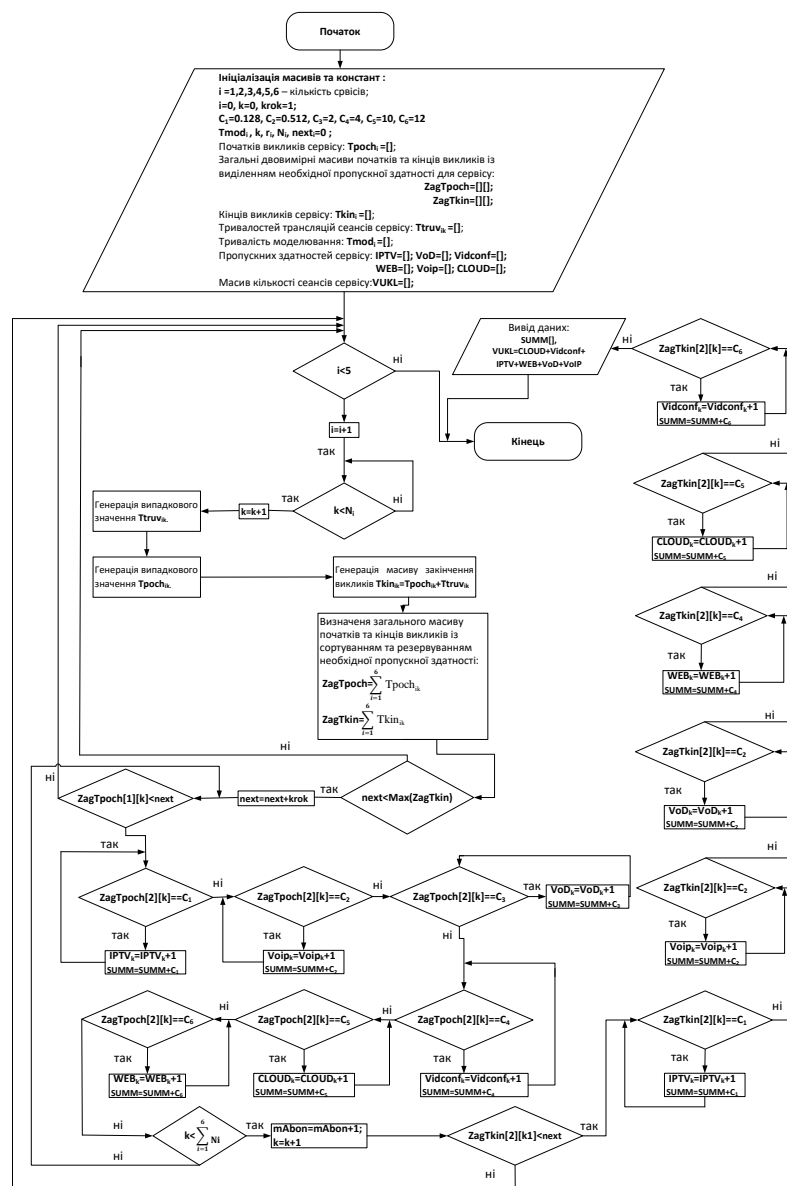


Рис. 4.17. Блок-схема методу імітаційної моделі динамічного розподілу пропускної здатності каналу [108]

В результаті моделювання отримано:

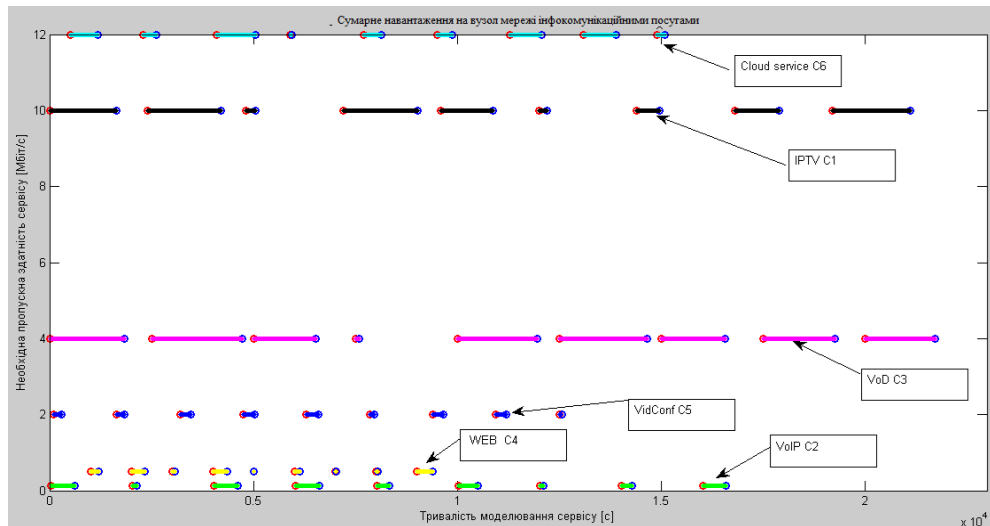


Рис. 4.18. Часова діаграма сеансів користування інфокомунікаційними послугами одним абонентом [108]

Як бачимо з рис. 4.18, тривалості сесій інфокомунікаційних послуг в процесі трансляції сервісів одним абонентом протягом 6 годин є випадковими величинами; при цьому вважаємо, що на тривалість сесії необхідно зарезервувати пропускну здатність, яка потрібна конкретному сервісу для забезпечення QoS у процесі доступу ресурсів до вузла мережі.

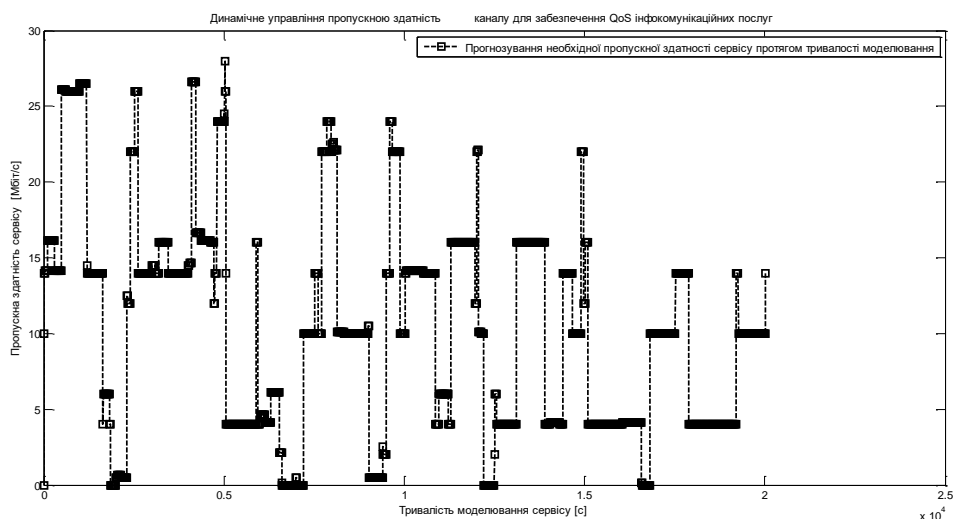


Рис. 4.19. Динамічне управління пропускною здатністю каналу

На рис. 4.19 відображено динаміку зміни зарезервованої пропускної здатності для забезпечення QoS протягом тривалості моделювання при доступі

абонента до вузла (маршрутизатора, базової станції), який користується декількома послугами. Як бачимо, у випадку користування різнорідними сервісами максимальна пропускна здатність, яку необхідно для нього зарезервувати, становить 27 Мбіт/с, забезпечуючи належний рівень QoS та не використовуючи всю доступну пропускну здатність каналу, надану провайдером мережі. В нашому випадку, максимальна пропускна здатність становить 100 Мбіт/с, проте для загального користування виділяється лише 88 Мбіт/с, резервуючи решту 12 Мбіт/с для сигналізаційних даних та механізмів управління.

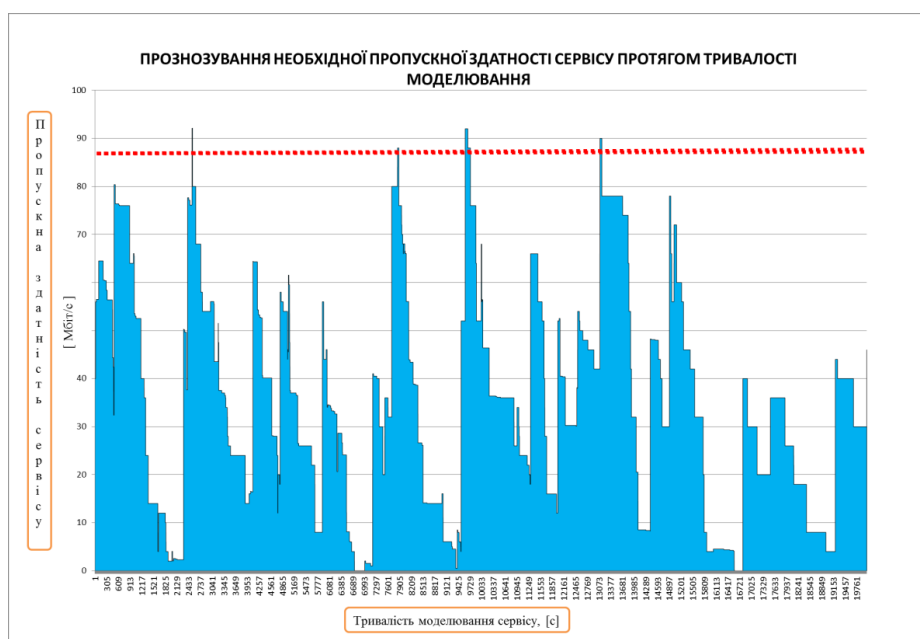


Рис. 4.20. Резервування необхідної пропускної здатності сервісу протягом тривалості моделювання для 4 абонентів

На рис. 4.20 та 4.21 показано результати резервування пропускної здатності для 4 абонентів та кількість трансляцій сервісів протягом тривалості моделювання створюваними ними, які користуються обраною множиною інфокомунікаційних послуг. З рис.4.21 бачимо, що в деякі моменти часу є відмова в обслуговуванні. Для вирішення цієї проблеми пропонується послугам критичним до затримок надавати вищий пріоритет на основі динамічної пріоритезації послуг .

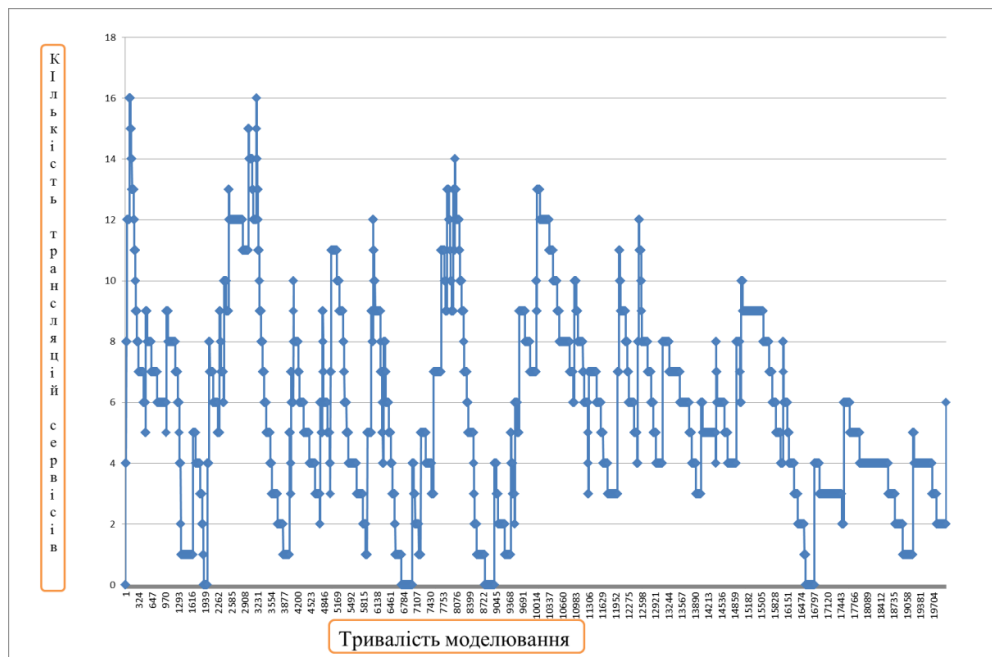


Рис. 4.21. Кількість трансляцій сервісів протягом тривалості моделювання для 4 абонентів

Одним з шляхів усунення зазначеного недоліку в рамках існуючої IP-мережі є розробка та впровадження нових методів прогнозування навантаження на елементи мережі, а також реалізація динамічного управління ресурсами IP-мережі. Для розроблення таких методів необхідно враховувати властивості реального мережевого трафіку, що було досліджено в попередніх розділах.

4.3.2. Дослідження завантаженості SDR фемтосоти як основного конвергентного пристрою на рівні доступу мережі користувачами технологій різного покоління мобільного зв'язку

Основним приладом, що повинен об'єднувати покоління 2-4,5G вибрано SDR фемтосоту – це мініатюрна базова станція, призначена для домашнього або офісного використання. Відповідно даний пристрій дає змогу здійснювати покриття різних поколінь мереж мобільного зв'язку маючи лише доступ до інтернету. Оскільки кожна з технологій має свої особливості та параметри функціонування, в роботі запропоновано алгоритм моделі управління радіо та фізичними ресурсами для прогнозування різноплановості та кількості

виділених ресурсів, необхідних для забезпечення якісного надання мультисервісних послуг абонентам мобільного зв'язку [110] (рис. 4.22.).

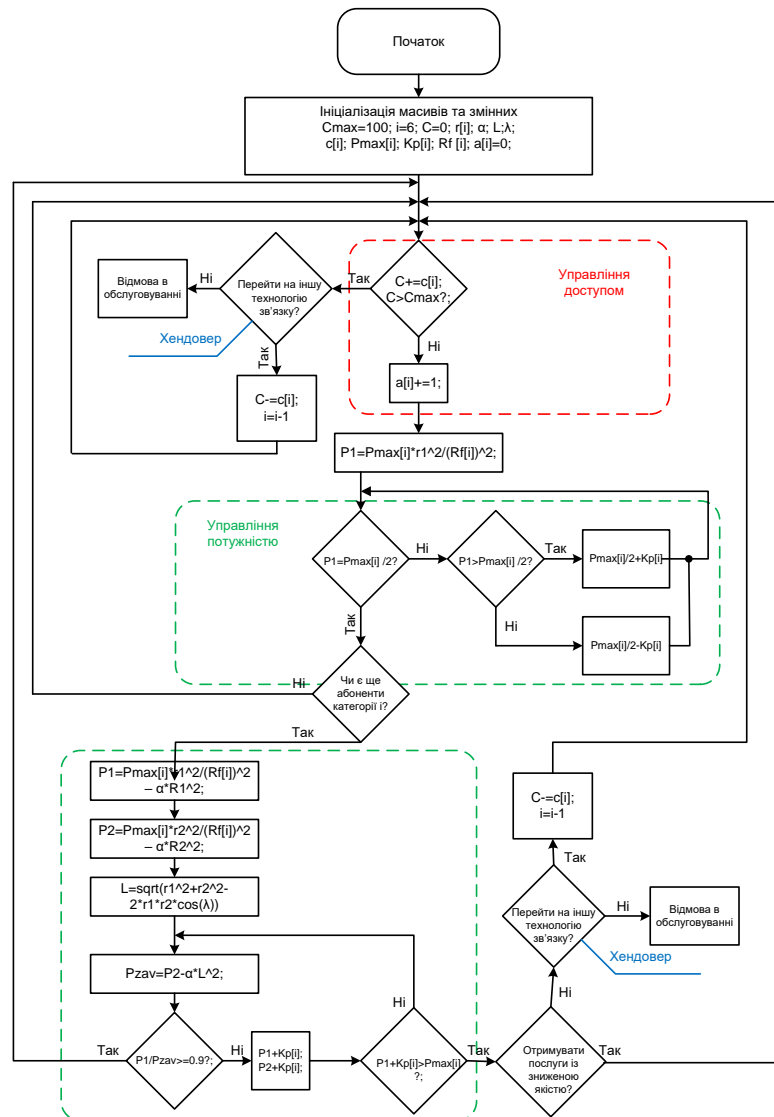


Рис. 4.22. Алгоритм моделі управління радіо інтерфейсами та фізичними ресурсами фемтосоти

Опис алгоритму:

У алгоритмі виконуються три базові функції: хендвер між абонентами всередині зони дії конвергентного пристрою, керування потужністю, що випромінюється та управління пропускнуою здатністю фемтосоти.

Крок 1: відбувається ініціалізація змінних та масивів, що будуть оброблені у радіоконтролері SDR фемтосоти.

Де:

Сmax – максимально пропускна здатність фемтосоти;

i – лічильник, що вказує, який інтерфейс мобільної технології активний;

C – змінна, для знаходження суми пропускних здатностей, що потрібні для обслуговування інтерфейсів, які підключені до фемтосоти;

$c[i]$ – масив значень пропускних здатностей технологій, необхідних для забезпечення якісного надання послуг;

$P_{\max}[i]$ – масив максимальних потужностей інтерфейсів;

$R_f [i]$ – масив значень радіусу дії зони обслуговування різних поколінь мобільного зв'язку;

$a[i]$ – масив, який показуватиме, скільки абонентів кожної з технологій підключено у даний момент;

$K_p[i]$ – масив значень кроків підлаштовування потужності;

$r[i]$ – масив значень зміни відстані перебування користувача від джерела випромінювання;

λ – кут між радіусами r_1 та r_2 абонентів однойменних технологій (0 -360);

α – втрати сигналу у просторі;

L – відстань між абонентами A та B ;

Крок 2: проходить перевірка на допустиму пропускну здатність (вона не повинна перевищувати 100 Мбіт/с). Якщо умова виконується, то перехід до 3 – го кроку, якщо ж ні – абоненту пропонується перейти на іншу технологію мобільного зв'язку. У випадку, коли користувач дає згоду на перехід зони обслуговування, технологія $[i]$ замінюється на менш ресурсозатратну $[i-1]$, із змінної C видаляється значення пропускної здатності, яку потребує технологія $[i]$, алгоритм повертається до кроку 2. Якщо ж абонент не згідний з переходом, він отримує відмову в обслуговуванні.

Крок 3: лічильник кількості абонентів збільшується на 1 для категорії мобільного зв'язку, до якої він належить; здійснюється розрахунок необхідної потужності, яку повинен випромінювати радіоінтерфейс для якісного надання послуг користувачеві.

Крок 4: на початку своєї роботи усі інтерфейси фемтосоти налаштовані так, що вони випромінюють тільки половину своєї максимальної потужності. Розрахована у кроці 3 потужність порівнюється з початковою. Якщо вона більша за початкову, то до початкової додається величина кроку підлаштування потужності; якщо ж менша – додається величина кроку; цикл продовжується до тих пір поки розрахована потужність не зрівняється з випромінюваною.

Крок 5 : відбувається перевірка чи присутні ще абоненти категорії [i]? Якщо так , то:

- а) відбувається розрахунок потужності, яку отримує абонент А з урахуванням загасання на відстані r_1 від джерела;
- б) розрахунок потужності, яку отримує абонент В з урахуванням загасання на відстані r_2 від джерела;
- в) розрахунок відстані від абонента А до абонента В;
- г) розрахунок величини завади, яка виникає у наслідок впливу В на А.

Крок 6: якщо відношення сигнал/шум (в нашому випадку відношення P_1/P_{zav}) більше 0.9, то абонент отримуватиме послуги якісно, якщо ж менше 0.9 – відбувається підвищення випромінюваної потужності джерела, відповідно підвищення потужностей P_1 та P_2 .

Крок 7: відбувається порівняння потужностей: якщо випромінювана потужність перевищує P_{max} – зниження якості обслуговування, оскільки потужність перевищує максимально допустиму для конкретної технології. Відповідно здійснюється перехід на іншу технологію, або, у випадку, якщо абонент відмовляється перейти – відмова у обслуговуванні.

У роботі розроблено імітаційну статистичну модель фемтосоти, як конвергентного пристрою на рівні доступу для забезпечення мультисервісних послуг з реалізацією вертикального хендоверу [111-113].

Вхідні дані імітаційної моделі: пропускна здатність каналу фемтосоти $C=10\text{Гбіт/с}$; кількість технологій мобільного зв'язку, які підтримуються станцією $i=7$ (GPRS, EDGE, WCDMA, CDMA20001RevA, HSPA, LTE, LTE-A)

необхідна пропускна здатність технології для забезпечення якісного надання послуг мобільним абонентам C_i =[Мбіт/с] (GPRS = 0.000171, EDGE =0.000384, WCDMA =2, CDMA20001RevA =3.1, HSPA =14.4, LTE =100, LTE-A 1000); ймовірність доступу абонентів i -ї категорії послуг до ресурсів фемтостільника p_i (0.15, 0.25, 0.2, 0.1, 0.15, 0.1, 0.05); тривалість виклику $T_{\text{трив.}}$ від i -го абонента, згенерованих за Пуасонівським законом розподілу із середнім значенням $\lambda=600\text{с}$; моменти початків викликів $T_{\text{поч.}}$ згенерованих випадковим чином з рівномірним законом розподілу; моменти кінців викликів, визначених як $T_{\text{кін}} = T_{\text{поч}}+T_{\text{трив.}}$; тривалість моделювання $T_{\text{трив.}}=1$ год;

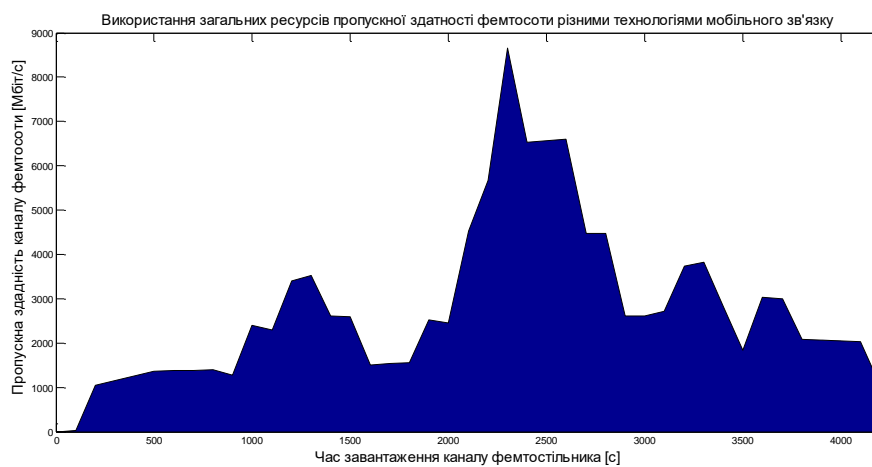


Рис. 4.23. Величина пропускної здатності, яку використовують абоненти при спільному використанні пристрою ($N=250$)

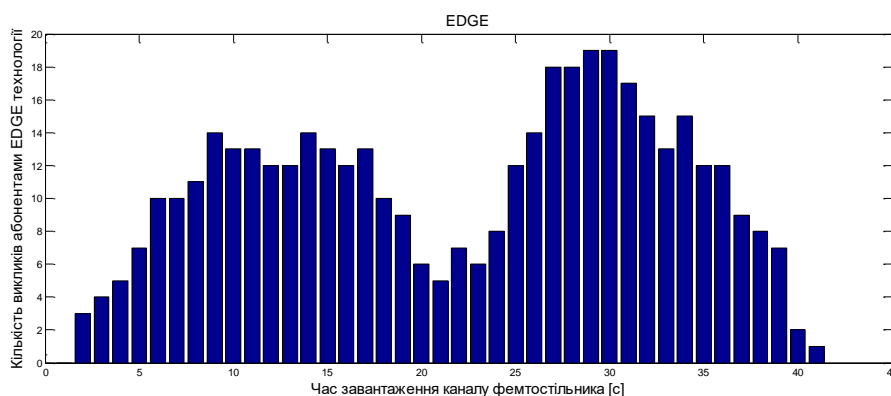


Рис. 4.24. Кількість абонентів EDGE протягом часу моделювання

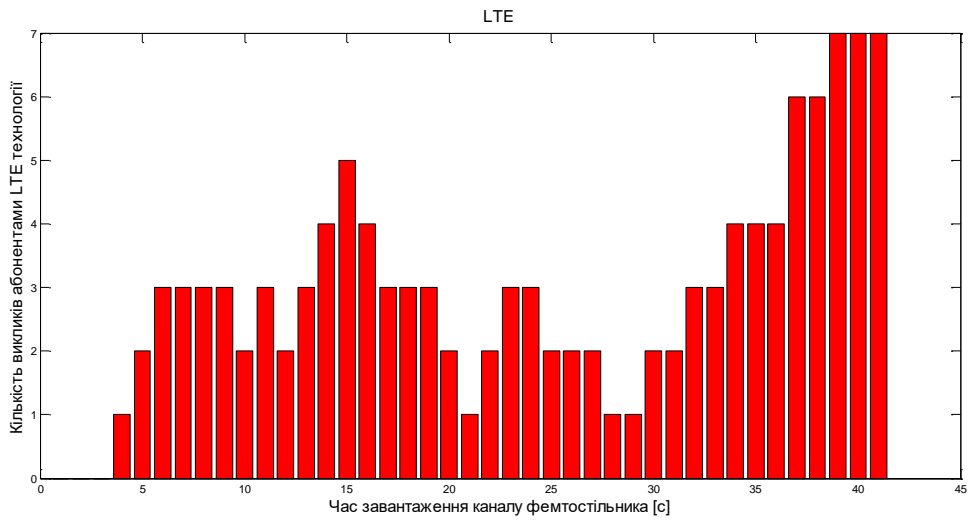


Рис. 4.25. Кількість абонентів LTE протягом часу моделювання

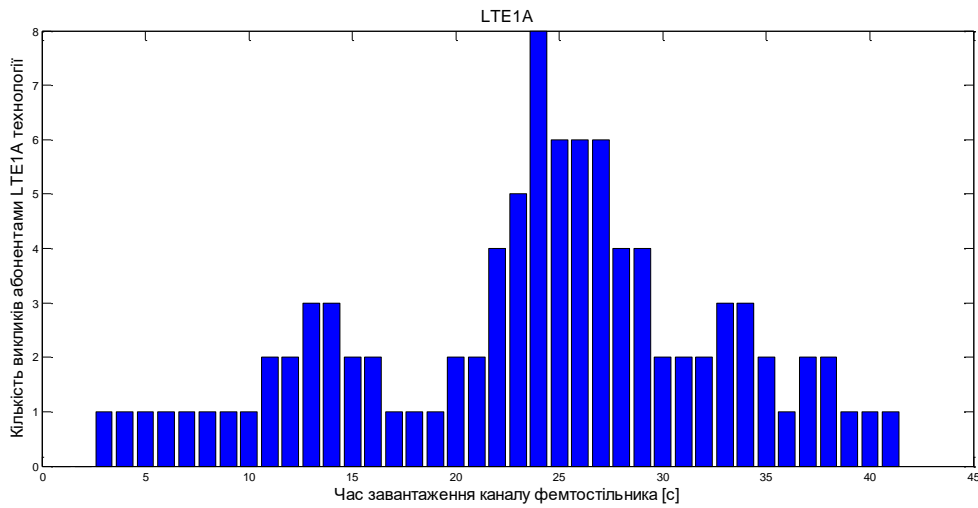


Рис. 4.26. Кількість абонентів LTE-A протягом часу моделювання

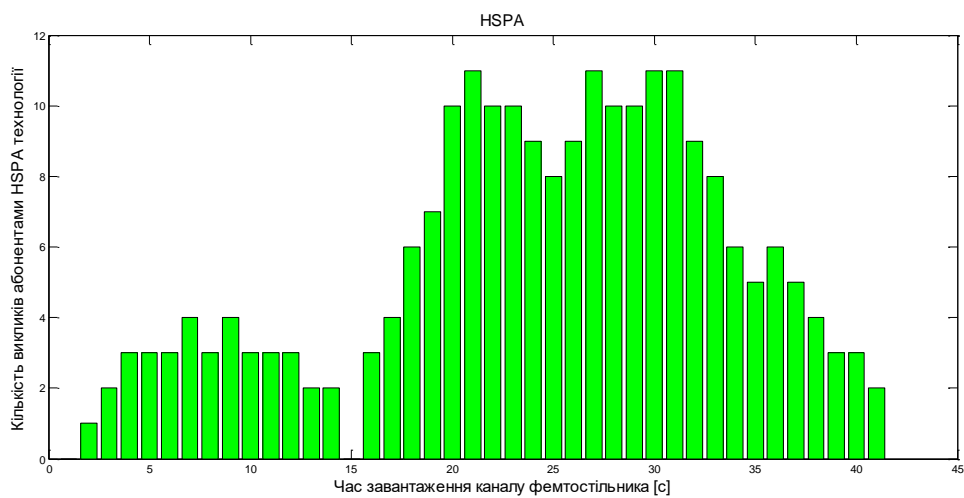


Рис. 4.27. Кількість абонентів HSPA протягом часу моделювання

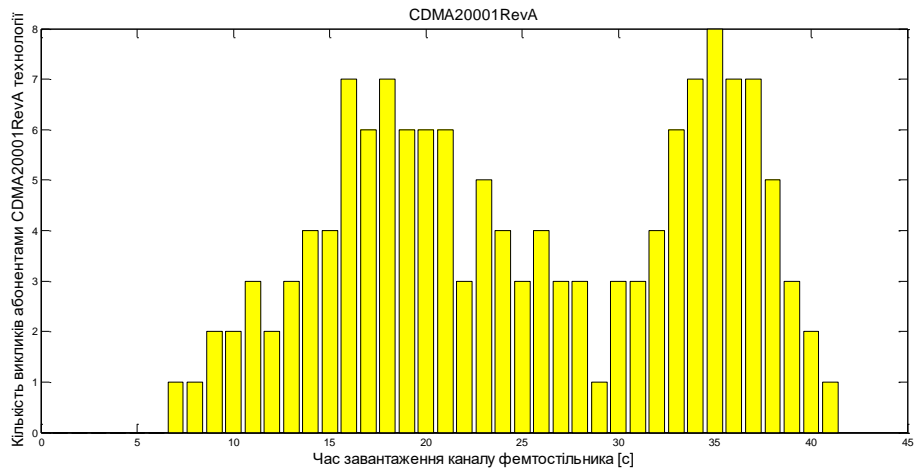


Рис. 4.28. Кількість абонентів CDMA20001RevA протягом часу моделювання

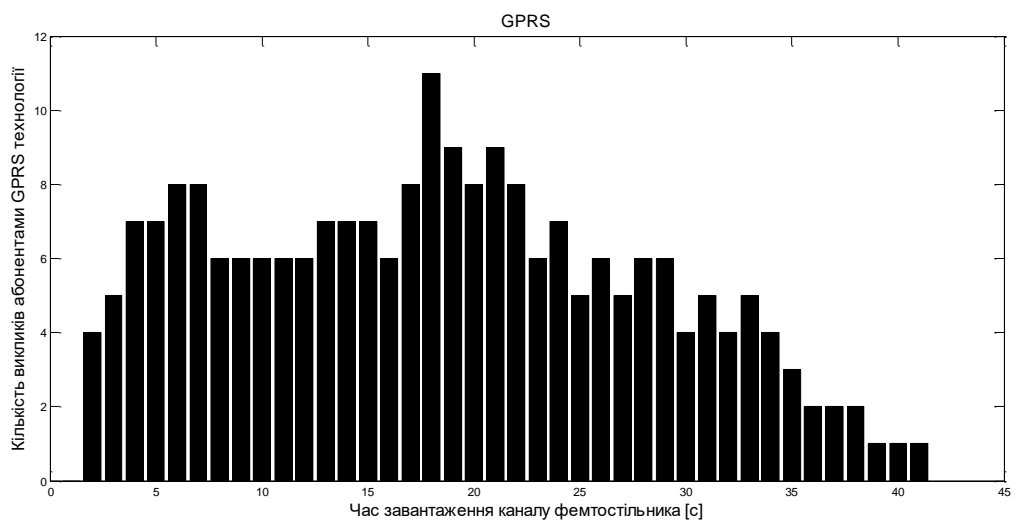


Рис. 4.29. Кількість абонентів GPRS протягом часу моделювання

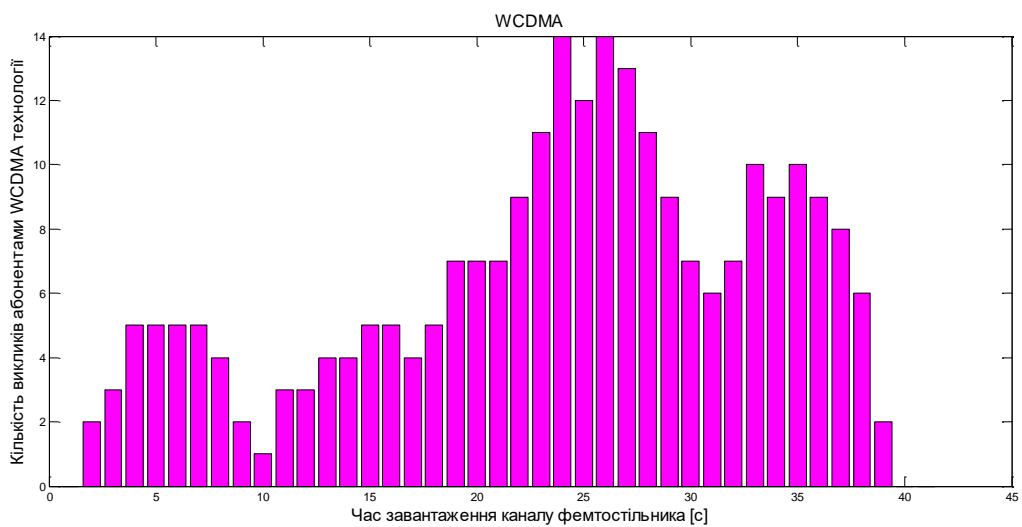


Рис. 4.30. Кількість абонентів WCDMA протягом часу моделювання

В результаті моделювання роботи конвергентного пристрою досліджено, що максимальна кількість викликів до фемтосоти від абонентів становить 250. Проте на 2350 с пропускна здатність, яку використовують абоненти мобільного зв'язку різних поколінь становить 8.45Гбіт/с з 10Гбіт/с можливих. Отримані результати показують, що конвергентний прилад здатен надавати якісні послуги визначеній кількості користувачів.

4.4. Висновок до розділу 4

У роботі пропонується підхід щодо побудови концептуальної моделі 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/ІоТ пристроїв з метою гарантування наскрізної якості обслуговування в умовах тимчасової нестачі спектральних ресурсів та нестабільності радіоканалу.

Дана модель базується на використанні вище запропонованого методу стосовно оптимального розподілу радіоресурсів. Проте, потреба у розробленні такої моделі полягає у тому, що запропоновані рішення у вищезгаданих розділах стосуються лише розподілу ресурсів на рівні базової станції так званому каналному рівні з метою раціонального використання ресурсів для забезпечення якості обслуговування в межах архітектури LTE. Обґрунтовано науково-теоретичні підходи щодо реалізації програмно-конфігурованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі технологій SDN/NFV TA SDR.

Створено алгоритм імітаційної моделі динамічного розподілу та резервування пропускної здатності фізичного каналу між декількома логічними в певний момент часу для забезпечення QoS інформаційним потокам. Проведено імітаційне моделювання обслуговування мережевого трафіку із параметрами, що відповідають реальним 4G мережам. Проведено дослідження завантаженості SDR фемтосоти, як основного конвергентного пристрою на рівні доступу мережі користувачами технологій різного покоління мобільного зв'язку.

ВИСНОВКИ

1. Проведено огляд існуючих методів управління інформаційним потоками та розподілу радіоресурсів для забезпечення якості обслуговування в мережах 4G/5G.. На основі проведеного аналізу встановлено, що відомі методи розподілу частотно-часового ресурсу не мають потрібної гнучкості при обслуговуванні мобільних користувачів і M2M датчиків з метою забезпечення необхідного рівня QoS. Обґрунтовано актуальність науково-практичного завдання дисертаційного дослідження. Зокрема встановлено, що в умовах зростання трафіку M2M, актуальним завданням для операторів мереж зв'язку 4G/5G є розроблення нових методів оптимального розподілу радіоресурсів та наскрізного управління інформаційними потоками

2. В роботі запропоновано доповнення класичної архітектури LTE мультистандартним шлюзом і метод гнучкого управління інформаційними потоками та мережевими ресурсами для забезпечення ними вимог зростаючої кількості M2M датчиків із гарантованим рівнем якості обслуговування. При кластеризації M2M датчиків та агрегації трафіку на шлюзі, контролер базової станції не буде розглядати вхідні заявки на обслуговування окремо від кожного датчика, а буде резервувати субкадри в межах кадру для комплексної заявки на обслуговування, що поступить від шлюза. Мультистандартний шлюз для формування комплексної заявки враховує умову гарантованого обслуговування, яка полягає у фіксуванні часу перебування даних у черзі на шлюзі із одночасним врахуванням часу обслуговування на базовій станції.

3. В роботі розроблено алгоритм кластеризації, агрегації та класифікації M2M пристроїв в майбутніх мережах 4G/5G, що дасть змогу ефективніше використовувати радіоресурс мобільної мережі, зменшити сигнальне навантаження на базову станцію та знизити енергозатрати M2M пристроїв. Новизна алгоритму полягає у виборі головного вузла M2M на основі діаграми Вороного та методів нечіткої логіки. Даний алгоритм реалізується на нововведених шлюзах M2M, який виконуватиме функції вибору головного

вузла, групування різноманітних даних на класи послуг та балансування навантаження між шлюзами з метою передавання даних на недовантаженні базові станції 4G/5G.

4. Розвинуто метод розподілу частотно-часових ресурсів в мережах стандарту LTE, який, на відміну від відомих, базується на адаптивному виборі ширини смуги радіочастот в залежності від вимог якості обслуговування, а також на пріоритетній агрегації трафіку у шлюзах M2M, що дало змогу підвищити ефективність використання ліцензійних радіоресурсів шляхом оптимізації процесу формування кадрів на каналному рівні LTE та зменшення в них частки службового трафіку. Розроблений метод оптимального розподілу ресурсів для LTE мереж нового покоління дав змогу в залежності від різних ситуацій моделювання (без та з врахуванням пріоритетів даних) підвищити від 4% до 13% ефективність використання частотно-часових ресурсів в процесі формування кадрів на каналному рівні LTE, в умовах одночасного використання ширини смуги каналу 1,4 МГц та 3 МГц.

5. Для дослідження запропонованого методу управління інформаційними потоками та розподілу ресурсів розроблено імітаційну модель, яка дає змогу дослідити процес виділення пропускних здатностей у низхідному та висхідному каналах зв'язку при різних вхідних параметрах, що впливають на неї, а саме: ширині каналу, кількості антен на передачу та прийом, тривалості циклічного префіксу та коефіцієнта RACH Group Scaling. В імітаційній моделі реалізовано обидва напрямки передавання даних. Також імітаційна модель дає змогу визначати значення загасання сигналу з відстанню при поширенні у просторі, шляхом вказання відповідних величин для відомих моделей і можливості підбору коефіцієнтів для замовної моделі. Загасання радіосигналу при поширенні у просторі впливає на величину відношення сигнал/шум, значення якого враховує контролер базової станції при визначенні модуляційно-кодової схеми. На основі імітаційного моделювання 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 %. На основі розробленої імітаційної моделі гетерогенної мережі LTE/NB-IoT встановлено, що використання пріоритетизації IoT трафіку в процесі планування частотно-часових ресурсів у вузькосмуговому спектрі NB-IoT, дає змогу зменшити середню затримку передавання повідомлень реального часу до 2,12 разів у порівнянні з існуючим методом пропорційного розподілу ресурсів в умовах високого навантаження.

6. Розроблено концептуальну модель програмно-конфігурованої мережі мобільного зв'язку 4G/5G на основі стандарту LTE, яка забезпечує 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, що дало змогу гарантувати часові параметри якості обслуговування з кінця в кінець в умовах короткочасної нестабільності характеристик безпроводних каналів зв'язку. Обґрунтовано науково-теоретичні підходи щодо реалізації програмно-конфігурованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі технологій SDN/NFV TA SDR.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. M. Kavre, A. Gadekar and Y. Gadhade, "Internet of Things (IoT): A Survey," *2019 IEEE Pune Section International Conference (PuneCon)*, Pune, India, 2019, pp. 1-6.
2. Y. Mehmood, F. Ahmad, I. Yaqoob, A. Adnane, M. Imran and S. Guizani, "Internet-of-things-based smart cities: Recent advances and challenges", *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 16-24, 2017.
3. D. Miorandi, S. Sicari, F. De Pellegrini and I. Chlamtac, "Internet of things: Vision applications and research challenges", *Ad Hoc Networks*, vol. 10, no. 7, pp. 1497-1516, 2012.
4. Y. Cao, T. Jiang and Z. Han, "A Survey of Emerging M2M Systems: Context, Task, and Objective," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 6, pp. 1246-1258, Dec. 2016.
5. J. Kim, J. Lee, J. Kim and J. Yun, "M2M Service Platforms: Survey, Issues, and Enabling Technologies," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 1, pp. 61-76, First Quarter 2014.
6. J. Kim, J. Lee, J. Kim and J. Yun, "M2M service platforms: Survey issues and enabling technologies", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 16, no. 1, pp. 61-76, 1st Quart. 2014.
7. Y. Zhang, R. Yu, S. Xie, W. Yao, Y. Xiao and M. Guizani, "Home M2M networks: Architectures standards and QoS improvement", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 4, pp. 44-52, April 2011.
8. H. S. Jang, S. M. Kim, H. Park and D. K. Sung, "A Preamble Collision Resolution Scheme via Tagged Preambles for Cellular IoT/M2M Communications," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 2, pp. 1825-1829, Feb. 2018.

9. C. -C. Chen, R. -G. Cheng, C. -Y. Ho, M. Kanj, B. Mongazon-Cazavet and N. Nikaein, "Prototyping of Open Source NB-IoT Network," *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*, Taipei, Taiwan, 2020, pp. 1-5.
10. R. G. Cheng et al., "Demo abstract – Design and implementation of an open source NB-IoT eNB", *IEEE INFOCOM 2018 – IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, April 2018.
11. X. Chen, Z. Li, Y. Chen and X. Wang, "Performance Analysis and Uplink Scheduling for QoS-Aware NB-IoT Networks in Mobile Computing," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 44404-44415, 2019.
12. H. Ko, G. Lee, D. Suh, S. Pack and X. Shen, "An Optimized and Distributed Data Packet Forwarding Scheme in LTE/LTE-A Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 5, pp. 3462-3473, May 2016.
13. L. Wannu, "Research on Maintenance and Fault Treatment of TD-LTE Equipment," *2018 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA)*, Changsha, China, 2018, pp. 135-138.
14. S. Chen, S. Sun, Y. Wang, G. Xiao and R. Tamrakar, "A comprehensive survey of TDD-based mobile communication systems from TD-SCDMA 3G to TD-LTE(A) 4G and 5G directions," in *China Communications*, vol. 12, no. 2, pp. 40-60, Feb. 2015.
15. Quqiao Wang and Xiaolin Li, "Analysis of LTE FDD and TD-LTE combination network's interference," *2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, Chengdu, China, 2016, pp. 2332-2336.
16. R. K. Murugesan and S. Ramadass, "IPv6 address distribution: An alternative approach," *2010 3rd IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology (IC-BNMT)*, Beijing, China, 2010, pp. 252-257.
17. J. Lee and J. H. Lee, "Performance Analysis and Resource Allocation for Cooperative D2D Communication in Cellular Networks With Multiple D2D Pairs," in *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 5, pp. 909-912, May 2019.

18. Hyung-sub Kim, Jee-hyeon Na and Eunsun Cho, "Resource allocation policy to avoid interference between cellular and D2D Links/ and D2D links in mobile networks," *The International Conference on Information Networking 2014 (ICOIN2014)*, Phuket, Thailand, 2014, pp. 588-591.

19. E. Fakhfakh, S. Hamouda and S. Tabbane, "Enhanced traffic offloading with D2D communications under noise rise constraint," *2016 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)*, Messina, Italy, 2016, pp. 1112-1116.

20. S. Sharma, N. Gupta and V. A. Bohara, "Insights from the measurement results for adaptive and cooperative D2D communication framework," *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Barcelona, Spain, 2018, pp. 1-6.

21. M. H. Mahmud, M. M. Hossain, A. A. Khan, S. Ahmed, M. A. Mahmud and M. H. Islam, "Performance Analysis of OFDM, W-OFDM and F-OFDM Under Rayleigh Fading Channel for 5G Wireless Communication," *2020 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*, Thoothukudi, India, 2020, pp. 1172-1177.

22. J. Robert, J. Zoellner and M. Slimani, "Adaptive Windowing for OFDM with Dense Subcarrier Spacing in Mobile Channels," *OFDM 2012; 17th International OFDM Workshop 2012 (InOWo'12)*, Essen, Germany, 2012.

23. J. Miroll, M. Beyer and T. Herfet, "An OFDM WLAN Multicast Hybrid Erasure Correction Prototype with Feedback Aggregation and Rate Adaptation," *OFDM 2012; 17th International OFDM Workshop 2012 (InOWo'12)*, Essen, Germany, 2012, pp. 1-8.

24. B. Kang, S. Kim, M. Choi, K. Cho, S. Jang and S. Park, "Analysis of Types and Importance of Sensors in Smart Home Services," *2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 14th International Conference on Smart City; IEEE 2nd International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)*, Sydney, NSW, Australia, 2016, pp. 1388-1389.

25. I. Terkesli, C. Demircan, I. Demirci, S. Yavuz and M. Taygun, "Industrial Spectrophotometric Smart Sensor Towards Real-Time Optimization of Textile Dyeing Process," *2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, Sophia Antipolis, France, 2019, pp. 1-5.
26. Y. Quiñonez, C. Lizárraga, J. Peraza, R. Estrada and D. Arredondo, "Application to control dog feeding using the Arduino platform and GSM/GPRS technology," *2019 8th International Conference On Software Process Improvement (CIMPS)*, Leon, Mexico, 2019, pp. 1-6.
27. Lv Zhian and Hu Han, "A bus management system based on ZigBee and GSM/GPRS," *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)*, Taiyuan, China, 2010, pp. V7-210-V7-213.
28. C. Parra, E. Tatayo, A. Paccha, C. Tipantuña and J. Carvajal, "SDR-Based Portable Open-Source GSM/GPRS Network for Emergency Scenarios," *2019 Sixth International Conference on eDemocracy & eGovernment (ICEDEG)*, Quito, Ecuador, 2019, pp. 268-273.
29. J. Tang and R. Lin, "Ranking-based Collaborative Clustering for Heterogeneous Information Network," *2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, Chongqing, China, 2018, pp. 246-250.
30. H. M. T. AL-HILFI, I. Marghescu and A. A. Sahrab, "E2E QoS Support Aided ITPC WiFi Network for Baghdad City: Performance Analysis," *2018 Recent Advances on Engineering, Technology and Computational Sciences (RAETCS)*, Allahabad, 2018, pp. 1-6.
31. T. Pliakas, G. Xilouris, N. Zotos and A. Kourtis, "A demonstration infrastructure for E2E QoS services provisioning," *2008 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, Cluj-Napoca, Romania, 2008, pp. 382-386.
32. M. Lee and S. K. Oh, "On resource block sharing in 3GPP-LTE system," *The 17th Asia Pacific Conference on Communications*, Sabah, Malaysia, 2011, pp. 38-42.

33. P. A. Barro, M. Zennaro and E. Pietrosemoli, "TLTN – The local things network: on the design of a LoRaWAN gateway with autonomous servers for disconnected communities," *2019 Wireless Days (WD)*, Manchester, UK, 2019, pp. 1-4.

34. A. Lavric, A. I. Petrariu and V. Popa, "SigFox Communication Protocol: The New Era of IoT?," *2019 International Conference on Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI)*, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 1-4.

35. Li Xiaoman and Lu Xia, "Design of a ZigBee wireless sensor network node for aquaculture monitoring," *2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, Chengdu, China, 2016, pp. 2179-2182.

36. С.В. Гаркуша, "Модель распределения блоков планирования в нисходящем канале связи технологии LTE," *Грузинский электронный научный журнал: Компьютерные науки и телекоммуникации*, 2013. – Вып. 3(39). – С. 76-94.

37. D. Panno and S. Riolo, "A New Joint Scheduling Scheme for GBR and non-GBR Services in 5G RAN," *2018 IEEE 23rd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, Barcelona, Spain, 2018, pp. 1-6.

38. F. Kuo, K. Ting, C. Tseng, H. Wang and Ming-Wei Chen, "Scheduling both GBR and non-GBR uplink bearers based on moving average of data rate," *2015 11th International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness (QSHINE)*, Taipei, Taiwan, 2015, pp. 11-16.

39. M. M. Nasralla and I. U. Rehman, "QCI and QoS Aware Downlink Packet Scheduling Algorithms for Multi-Traffic Classes over 4G and beyond Wireless Networks," *2018 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT)*, Sakhier, Bahrain, 2018, pp. 1-7.

40. E. Obiodu and N. Sastry, "From ATM to MPLS and QCI: The Evolution of Differentiated QoS Standards and Implications for 5G Network Slicing," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 14-21, June 2020.

41. A. Aghmadi, I. Bouksim, A. Kobbane and T. Taleb, "A MTC traffic generation and QCI priority-first scheduling algorithm over LTE," *2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*, Marrakech, Morocco, 2015, pp. 1-6.

42. A. Assar and K. Hofmann, "A hardware implementation of the TCP protocol applying TCP-BIC and TCP-CUBIC standards," *2016 28th International Conference on Microelectronics (ICM)*, Giza, Egypt, 2016, pp. 37-40.

43. R. Umar, F. Yang and S. Mughal, "Network polar coded-cooperative SC-FDMA system," *2019 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)*, Beijing, China, 2019, pp. 1-5.

44. J. S. Roy and S. S. Mishra, "Performance of SC-FDMA for LTE Uplink Under Different Modulation Schemes," *2019 International Conference on Mechatronics, Robotics and Systems Engineering (MoRSE)*, Bali, Indonesia, 2019, pp. 202-206.

45. Navita and Amandeep, "Performance analysis of OFDMA, MIMO and SC-FDMA technology in 4G LTE networks," *2016 6th International Conference - Cloud System and Big Data Engineering (Confluence)*, Noida, India, 2016, pp. 554-558.

46. H. Liang, Y. Jhan, M. Wu and C. Cheng, "Combining the product code technique and constellation extension scheme to reduce the PAPR of SC-FDMA systems," *2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC)*, Danang, Vietnam, 2016, pp. 1-4.

47. R. Zeng, T. Liu, X. Yu and Z. Zhang, "Novel Channel Quality Indicator Prediction Scheme for Adaptive Modulation and Coding in High Mobility Environments," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 11543-11553, 2019.

48. M. B. Shahab, "Efficient channel quality indicator reporting schemes in LTE with reduced signaling overhead," *2015 38th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Prague, Czech Republic, 2015, pp. 123-128.

49. M. M. Hamed, S. Shukry, M. S. El-Mahallawy and S. H. El-Ramly, "Modified earliest deadline first scheduling with channel quality indicator for downlink real-time traffic in LTE networks," *The Third International Conference on e-Technologies and Networks for Development (ICeND2014)*, Beirut, Lebanon, 2014, pp. 8-12.

50. T. Ngo, B. Kelley and P. Rad, "Deep Learning Based Prediction of Signal-to-Noise Ratio (SNR) for LTE and 5G Systems," *2020 8th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*, Reims, France, 2020, pp. 1-6.

51. R. Umar, F.-F. Yang, H. Xu and S. Mughal, "Multi-level construction of polar-coded single carrier-FDMA based on MIMO antennas for coded cooperative wireless communication", *IET communications*, vol. 12, no. 10, pp. 1253-1262, 2018.

52. S. Bandopadhyaya and J. S. Roy, "Spectral Efficiency in wWireless Networks Through MIMO-OFDM System. Ch. 10" in *Handbook of Research on Advanced Wireless Sensor Network Applications Protocols and Architectures* IGI Global, pp. 249-277, 2017.

53. R. A. Patil, P. Kavipriya and B. P. Patil, "Bit Error Rate Analysis of 16 X 16 MIMO - OFDM in Downlink transmission for LTE - A," *2018 International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, Tirunelveli, India, 2018, pp. 82-87.

54. M. A. Mehaseb, Y. Gadallah, A. Elhamy and H. Elhennawy, "Classification of LTE Uplink Scheduling Techniques: An M2M Perspective," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1310–1335, 2016.

55. F. Ghandour, M. Frikha and S. Tabbane, "A fair and power saving uplink scheduling scheme for 3GPP LTE systems," *2011 International Conference on the Network of the Future*, pp. 6–9, France, 2011.

56. I. Abdalla and S. Venkatesan, "A QoE preserving M2M-aware hybrid scheduler for LTE uplink," *2013 International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking (MoWNeT)*, pp. 127– 132, Canada, 2013.

57. A. E. Mostafa and Y. Gadallah, "A Statistical Priority-Based Scheduling Metric for M2M Communications in LTE Networks," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 8106–8117, 2017.

58. M. Ouaisa and A. Rhattoy, "QoS hybrid uplink scheduler based on service type for M2M communications in LTE networks", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 14, no. 3, pp. 460–470, 2019.

59. H. B. Rekhissa, C. Belleudy, and P. Bessagnet, "Energy Efficient Resource Allocation for M2M Devices in LTE/LTE-A", *Sensors*, vol. 19, no. 24, p. 5337–5353. 2019.

60. Z. Dawy, W. Saad, A. Ghosh, J. G. Andrews and E. Yaacoub, "Toward massive machine type cellular communications", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 1, pp. 120–128, 2017.

61. X. Shih, H. Chou and J. Chen, "A Well-Arranged FIFO-Storage Distribution Design Plan for Fully Supporting 50 Different FFT Sizes in 3GPP-LTE Communication Applications," *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*, Taichung, Taiwan, 2018, pp. 1-2.

62. S. Banerjee, S. M. Rakshit, M. Hempel and H. Sharif, "5G-UCDA in High Speed Rail with Multi Antenna-to-Logical Cell Circular FIFO Mapping Strategy," *2018 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Maui, HI, USA, 2018, pp. 665-669.

63. X. Shih and H. Chou, "A 2-D grouping FIFO based hardware architecture for supporting 36-mode hybrid-radix FFT design in 3GPP-LTE systems," *2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, Nagoya, Japan, 2017, pp.

64. A. M. Elnaka, Q. H. Mahmoud and Xining Li, "Simulation based comparative performance analysis of QoS traffic scheduling using fair and delay adaptive scheduler (FDAS) versus WFQ and EDF," *2016 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 916-923.

65. X. Zhu, N. Zhang, G. Kang, Y. Zhang and S. Zhang, "Realization of a new random access scheme for resource efficiency in M2M communications," *2016 19th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, Shenzhen, China, 2016, pp. 217-220.

66. J. Rinne, J. Keskinen, P. R. Berger, D. Lupo and M. Valkama, "Viability Bounds of M2M Communication Using Energy-Harvesting and Passive Wake-Up Radio," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 27868-27878, 2017.

67. S. Chen, Z. Honggang and L. Xian, "Energy Group based Random Access Method for M2M Communications," *2018 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC)*, Qingdao, China, 2018, pp. 1-5.

68. L. Zhen *et al.*, "Optimal Preamble Design in Spatial Group-Based Random Access for Satellite-M2M Communications," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 953-956, June 2019.

69. S. Oh, H. Kim and Y. Kim, "User mobility impacts to mobility load balancing for self-organizing network over LTE system," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 1082-1086.

70. M. Saeed, M. El-Ghoneimy and H. Kamal, "An enhanced fuzzy logic optimization technique based on user mobility for LTE handover," *2017 34th National Radio Science Conference (NRSC)*, Alexandria, Egypt, 2017, pp. 230-237.

71. A. B. Shams, S. R. Abied and M. A. Hoque, "Impact of user mobility on the performance of downlink resource scheduling in Heterogeneous LTE cellular networks," *2016 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*, Dhaka, 2016, pp. 1-6.

72. Ayman ElNashar; Mohamed A. El-saidny; Mahmoud Sherif, "LTE Network Architecture and Protocols," in *Design, Deployment and Performance of 4G-LTE Networks: A Practical Approach*, Wiley, 2014, pp.1-45.

73. 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.

74. 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.

75. 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.

76. 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.

77. 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.

78. 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.

79. . 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.

80. R. Ratasuk, B. Vejlgaard, N. Mangalvedhe and A. Ghosh, "NB-IoT system for M2M communication," *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, 2016, pp. 428-432.

81. A. Asadi and V. Mancuso, "WiFi Direct and LTE D2D in action," *2013 IFIP Wireless Days (WD)*, 2013, pp. 1-8.

82. Г.В. Бешлей, М.О. Селюченко, І.А Берневек, С.І. Пушак, М.І. Бешлей, "Алгоритм кластеризації, агрегації та класифікації М2М пристроїв в гетерогенній мережі 4G/5G," *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації*, № 874, с. 95 – 102, 2017.

83. O. Wolkenhauer and J. M. Edmunds, "A fuzzy systems toolbox for use with MATLAB," *IEE Colloquium on Fuzzy Logic Controllers in Practice*, 1996, pp. 9/1-9/4.

84. О. А. Лаврів, М. І. Бешлей, М. М. Гнатчук, А. В. Поліщук, "Модель системи управління ресурсами мультисервісних мереж в умовах самоподібності трафіку," *Вісник Національного університету "Львівська політехніка", серія "Радіoeлектроніка та телекомунікації"*, №. 738, с. 165–172, 2012.

85. 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.

86. 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.

87. Y. Xu *et al.*, "Enhancements on Coding and Modulation Schemes for LTE-Based 5G Terrestrial Broadcast System," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 66, no. 2, pp. 481-489, June 2020.

88. 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.

89. R. Pagliari, Y. . -W. P. Hong and A. Scaglione, "Bio-inspired algorithms for decentralized round-robin and proportional fair scheduling," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 28, no. 4, pp. 564-575, May 2010.

90. P. Andres-Maldonado, P. Ameigeiras, J. Prados-Garzon, J. J. Ramos-Munoz and J. M. Lopez-Soler, "Reduced M2M signaling communications in 3GPP LTE and future 5G cellular networks," *2016 Wireless Days (WD)*, 2016, pp. 1-3.

91. S. Singh and K. Huang, "A robust M2M Gateway for effective integration of capillary and 3GPP networks," *2011 Fifth IEEE International Conference on Advanced Telecommunication Systems and Networks (ANTS)*, 2011, pp. 1-3.

92. F. Ghavimi and H. Chen, "M2M Communications in 3GPP LTE/LTE-A Networks: Architectures, Service Requirements, Challenges, and Applications," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 525-549, Secondquarter 2015.

93. H. Beshley, M. Beshley, M. Medvetskyi, J. Pyrih, "QoS-Aware Optimal Radio Resource Allocation Method for Machine Type Communications in 5G LTE and Beyond Cellular Networks", *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021.

94. 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.

95. . 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.

96. 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.

97. 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.

98. 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.

99. 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.

100. LTE QoS (Part 2) - LTE QoS Parameters (QCI, ARP, GBR, MBR and AMBR)', Network Manias. <https://www.netmanias.com/en/?m=view&id=blog&no=5933> (accessed March 03, 2021).

101. 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.

102. 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.

103. 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.

104. 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.

105. 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.

106. 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.

107. 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.

108. 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.

109. 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.

110. 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 симпозиум "Нові технології в телекомунікація"*, с. Вишків, 2013р., с. 43 – 46.

111. 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.

112. 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.

113. 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.

ДОДАТОК А. Акти впровадження

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор
ТзОВ «Телекомунікаційна компанія»

Пентак І.М.

“ 26 ” 01 2021 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Бешлей Галини Володимирівни

«Моделі та метод оптимального розподілу мережних ресурсів в програмно-конфігурованих гетерогенних мережах мобільного зв'язку»

Даний акт складений про те, що у ТзОВ «Телекомунікаційна компанія» для підвищення рівня якості сприйняття відеоконтенту в телекомунікаційній мережі використані результати дисертаційної роботи Бешлей Г.В. «Моделі та метод оптимального розподілу мережних ресурсів в програмно-конфігурованих гетерогенних мережах мобільного зв'язку», представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме:

- алгоритм пріоритетного обслуговування черг пакетів у вузлах зовнішніх ІР-орієнтованих мережах дав змогу гарантувати часові параметри якості обслуговування потокового трафіку реального часу з кінця в кінець в умовах короткочасної нестабільності характеристик безпроводних каналів зв'язку. Зокрема у порівнянні із відомим алгоритмом пріоритетного обслуговування черг запропонований алгоритм зменшує до 30% затримку та джиттер пакетів в процесі обслуговування потокового трафіку реального часу.
- способу застосування мультистандартних М2М шлюзів в архітектурі безпроводної мережі, який дав змогу мінімізувати кількість сигнальної інформації в процесі агрегації М2М 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%.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ «Телекомунікаційна компанія», відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 3%.

Головний інженер



Рубаха І.М.



Науково-дослідний інститут
інтелектуальних комп'ютерних систем

Research Institute of
Intelligent Computer Systems



West Ukrainian National University
Ministry of Education and Science of Ukraine
Glushkov Institute of Cybernetics
National Academy of Sciences of Ukraine

3 Peremoga Square, Ternopil, 46009, Ukraine
Tel: +380 (352) 475050 ext.12234
Fax: +380 (352) 47-5053 (24 hrs)
<http://ics.wunu.edu.ua/> ics@wunu.edu.ua

Західноукраїнський національний університет
Міністерство освіти і науки України
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова
Національна академія наук України

пл. Перемоги 3, Тернопіль, 46009, Україна
Тел: +380 (352) 475050 внутр.12234
Факс: +380 (352) 47-5053 (24 год)
<http://ics.wunu.edu.ua/> ics@wunu.edu.ua

№ _____

« 27 » 11 2016

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Бешлей Галини Володимирівни

«Моделі та метод оптимального розподілу мережних ресурсів в програмно-конфігурованих гетерогенних мережах мобільного зв'язку»

Даний акт складений про те, що у Науково-дослідному інституті інтелектуальних комп'ютерних систем для підвищення якості обслуговування користувачів в інформаційно-комунікаційних мережах використані результати дисертаційної роботи Бешлей Г.В. «Моделі та метод оптимального розподілу мережних ресурсів в програмно-конфігурованих гетерогенних мережах мобільного зв'язку», представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме:

- алгоритм пріоритетного обслуговування черг пакетів у вузлах IP-орієнтованих мережах (маршрутизаторах, комутаторах) дав змогу гарантувати часові параметри якості обслуговування потокового трафіку реального часу з кінця в кінець в умовах короткочасної нестабільності характеристик безпроводних каналів зв'язку. Зокрема у порівнянні із відомим алгоритмом пріоритетного обслуговування черг запропонований алгоритм зменшує до 30% затримку та джиттер пакетів в процесі обслуговування потокового трафіку реального часу.
- модель програмно-керованого IP маршрутизатора, яка базується на використанні удосконаленого алгоритму пріоритетного обслуговування черг пакетів. Перевагою використання програмного маршрутизатора на практиці дало змогу замінити існуюче пропрієтарне обладнання на гнучкі програмно-керовані мережеві пристрої розгорнутих на серверних платформах з різною продуктивністю.

Директор
Науково-дослідного інституту
інтелектуальних комп'ютерних систем



Кочан В.В.

«Затверджую»
Проректор з наукової роботи
Національного університету
Дніпровська політехніка
д.т.н. І.В. Демидов
2020 р.


АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Бешлей Галини Володимирівни «Моделі та метод оптимального розподілу мережних ресурсів в програмно-конфігурованих гетерогенних мережах мобільного зв'язку».

Комісія у складі начальника науково-дослідної частини, к.т.н., Небесного Р.В., заступника начальника планово-фінансового відділу Чулой Т.М., завідувача кафедри телекомунікацій, д.т.н., проф. Климаша М.М., склала цей акт у тому, що у держбюджетних науково-дослідних роботах: «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (ДБ/5G), (№ держреєстрації 0117U004449, (2017–2018 рр.); «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні» (ДБ/LTE-U), (№ держреєстрації 0117U007177, (2018–2019 рр.); «Розроблення новітньої децентралізованої мережі мобільного зв'язку на основі блокчейн-архітектури та штучного інтелекту для впровадження технологій 5G/6G в Україні» (ДБ/Блокчейн), (№ держреєстрації 0120U100674, (2020-2022 рр.); «Розроблення та інтеграція інформаційних і комунікаційних технологій для побудови системи моніторингу та управління міською інфраструктурою» (ДБ/SmartCity), (№ держреєстрації 0120U102193, (2020-2022 рр.) – *відповідальний виконавець*.) використані наступні результати дисертаційної роботи Бешлей Галини Володимирівни на тему «Моделі та метод оптимального розподілу мережних ресурсів в програмно-конфігурованих гетерогенних мережах мобільного зв'язку»:


- алгоритм управління потоками даних на основі кластеризації, пріоритезації та агрегації M2M трафіку в мережі 4G/5G;
- метод оптимального розподілу частотно-часових ресурсів в мережах стандарту LTE;
- модель програмно-конфігурованої мережі мобільного зв'язку 5G із наскрізним адаптивним управлінням мережними ресурсами та інформаційними потоками для забезпечення необхідної якості надання послуг.

Члени комісії:

 Небесний Р.В.
 Чулой Т.В. /
 Климаш М.М.

«Затверджую»

Проректор з науково-педагогічної
роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»

 доц. О.Р. Давидчак
« 16 » 09 2020 р.



АКТ




про використання результатів дисертаційної роботи Бешлей Галини Володимирівни на тему «Моделі та метод оптимального розподілу мережних ресурсів в програмно-конфігурованих гетерогенних мережах мобільного зв'язку», у навчальному процесі кафедри телекомунікацій.

Даний акт складений комісією у складі:

- д.т.н., Стрихалюка Б.М., директора Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- д.т.н., доц., Кайдана М.В., декана магістратури Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- д.т.н., проф. Климаша М.М., завідувача кафедри телекомунікацій.

проте, що в навчальному процесі кафедри телекомунікацій використано результати дисертаційної роботи Бешлей Г.В. «Моделі та метод оптимального розподілу мережних ресурсів в програмно-конфігурованих гетерогенних мережах мобільного зв'язку», а саме імітаційну модель процесу функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку, яка враховує основні технічні параметри функціонування стандарту LTE для створення реальних умов дослідження та автоматизує розроблений Бешлей Галиною Володимирівною метод оптимального розподілу частотно-часових ресурсів між трафіком мобільних користувачів та M2M/IoT пристроїв з метою забезпечення необхідної якості обслуговування, що дало змогу з урахуванням обмеженості спектральних ресурсів оцінити ефективність розроблених рішень в процесі оптимізації радіоресурсів мережі у порівняння із відомими методами. Зокрема, результати використані для модернізації курсу лекцій (Лекції 18–22 «Методи оптимального розподілу ресурсів та управління інформаційними потоками в мережах мобільного зв'язку нового покоління») та лабораторних робіт (Лабораторні 6–7 «Дослідження процесу розподілу радіоресурсів в межах функціонування однієї базової станції LTE» з дисципліни «Побудова та протоколи гетерогенних мереж мобільного зв'язку» спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Члени комісії:


Стрихалюк Б.М.

Кайдан М.В.

Климаш М.М.

ДОДАТОК Б. Фрагменти програмних кодів імітаційних моделей реалізації процесів функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку 4G/5G

1. Імітаційна модель процесу організації наскрізного гарантування пропускної здатності каналу в концептуальній мережі мобільного зв'язку

```
case "100 MHz": {
    int aggregation = 5;
    if (pichDuration.equals("Normal")) {
        nSym = 7;
        nRB = 100;
        totalREUp = aggregation * nRB * 12 * nSym * 20;
        if (numberOfAntenna.equals("Single Antenna")) {
            nAntenna = 1;
            totalREUp = totalREUp * nAntenna;
            dataResourceElementUp[4] = 60 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[3] = 120 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[2] = 300 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[1] = 180 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[0] = totalREUp - dataResourceElementUp[1] - dataResourceElementUp[2] - dataResourceElementUp[3] -
dataResourceElementUp[4];
        } else if (numberOfAntenna.equals("2x2 MIMO")) {
            nAntenna = 2;
            totalREUp = totalREUp * nAntenna;
            dataResourceElementUp[4] = 60 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[3] = 120 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[2] = 300 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[1] = 180 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[0] = totalREUp - dataResourceElementUp[1] - dataResourceElementUp[2] - dataResourceElementUp[3] -
dataResourceElementUp[4];
        } else if (numberOfAntenna.equals("4x4 MIMO")) {
            nAntenna = 4;
            totalREUp = totalREUp * nAntenna;
            dataResourceElementUp[4] = 60 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[3] = 120 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[2] = 300 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[1] = 180 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[0] = totalREUp - dataResourceElementUp[1] - dataResourceElementUp[2] - dataResourceElementUp[3] -
dataResourceElementUp[4];
        }
    } else {
        nSym = 6;
        nRB = 100;
        totalREUp = nRB * 12 * nSym * 20;
        if (numberOfAntenna.equals("Single Antenna")) {
            nAntenna = 1;
            totalREUp = totalREUp * nAntenna;
            dataResourceElementUp[4] = 60 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[3] = 120 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[2] = 300 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[1] = 180 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[0] = totalREUp - dataResourceElementUp[1] - dataResourceElementUp[2] - dataResourceElementUp[3] -
dataResourceElementUp[4];
        } else if (numberOfAntenna.equals("2x2 MIMO")) {
            nAntenna = 2;
            totalREUp = totalREUp * nAntenna;
            dataResourceElementUp[4] = 60 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[3] = 120 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[2] = 300 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[1] = 180 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[0] = totalREUp - dataResourceElementUp[1] - dataResourceElementUp[2] - dataResourceElementUp[3] -
dataResourceElementUp[4];
        } else if (numberOfAntenna.equals("4x4 MIMO")) {
            nAntenna = 4;
            totalREUp = totalREUp * nAntenna;
            dataResourceElementUp[4] = 60 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[3] = 120 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[2] = 300 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[1] = 180 * nRB * nAntenna * aggregation;
            dataResourceElementUp[0] = totalREUp - dataResourceElementUp[1] - dataResourceElementUp[2] - dataResourceElementUp[3] -
dataResourceElementUp[4];
        }
    }
}
```

```

        break;
    }
}
return dataResourceElementUp;
}

public String setStandartThroughputsUp(int PUSCH, int pozModulation, float kodRate) {

    double rate = (PUSCH * pozModulation * kodRate) / (10 * 0.001 * 1000000);
    double tmpRate = Math.round(rate * 10000);
    return String.valueOf(tmpRate / 10000);
}

// public String setWinnBitThroughputsUp(int numberOfDevice, int PUSCH, int PUSCHRS, int PUCCH, int PUCCHRS, int SRS, int
// pozModulation, float kodRate) {
//
//     setUsersModifiedREUp(numberOfDevice, PUSCH, PUSCHRS, PUCCH, PUCCHRS, SRS);
//
//     int tmpResourceElement = getUsersModifiedREUp();
//     double rate = (tmpResourceElement * pozModulation * kodRate) / (10 * 0.001 * 1000000);
//     double tmpRate = Math.round(rate * 10000);
//
//     return String.valueOf(tmpRate / 10000);
// }

// public void setUsersModifiedREUp(int numberOfDevice, int PUSCH, int PUSCHRS, int PUCCH, int PUCCHRS, int SRS) {
//
//     if (numberOfDevice == 1) {
//         modifiedUsersREUp = PUSCH;
//     } else {
//         int total = PUCCH + PUCCHRS + SRS;
//         int remain = (int) Math.ceil((double) (total / numberOfDevice));
//         if (remain == 0) {
//             remain = 1;
//         }
//         int tmpResourceElement = PUSCH + (total - remain);
//
//         modifiedUsersREUp = tmpResourceElement;
//     }
// }

// }

public String setWinnBitThroughputsUp(int numberOfDevice, int PUSCHRS, int PUCCH, int PUCCHRS, int SRS, int pozModulation, float
kodRate) {

    double resultWinnBit = 0;

    if (numberOfDevice > 1) {
        int winPUSCHRS = (int) Math.ceil(PUSCHRS / numberOfDevice);
        int winPUCCH = (int) Math.ceil(PUCCH / numberOfDevice);
        int winPUCCHRS = (int) Math.ceil(PUCCHRS / numberOfDevice);
        int winSRS = (int) Math.ceil(SRS / numberOfDevice);
        int totalWinnRE = winPUSCHRS + winPUCCH + winPUCCHRS + winSRS;
        resultWinnBit = totalWinnRE * pozModulation * kodRate;
    }
}

// setUsersModifiedREUp(numberOfDevice, PUSCH, PUSCHRS, PUCCH, PUCCHRS, SRS);
//
// int tmpResourceElement = getUsersModifiedREUp();
// double rate = (tmpResourceElement * pozModulation * kodRate) / (10 * 0.001 * 1000000);
// double tmpRate = Math.round(rate * 10000);
//
// return String.valueOf(tmpRate / 10000);
return String.valueOf(resultWinnBit);
}

// public void setUsersModifiedREUp(int numberOfDevice, int PUSCH, int PUSCHRS, int PUCCH, int PUCCHRS, int SRS) {
//
//     if (numberOfDevice == 1) {
//         modifiedUsersREUp = PUSCH;
//     } else {
//         int total = PUCCH + PUCCHRS + SRS;
//         int remain = (int) Math.ceil((double) (total / numberOfDevice));
//         if (remain == 0) {
//             remain = 1;
//         }
//         int tmpResourceElement = PUSCH + (total - remain);
//
//         modifiedUsersREUp = tmpResourceElement;
//     }
// }

```



```

//      modifiedUsersREUp = tmpResourceElement;
//    }
//  }
// }

public int getUsersModifiedREUp() {
    return modifiedUsersREUp;
}

public String setStandartThroughputsTRUEDown(int PDSCH, String modRate) {
//  System.out.println("modRate: " + modRate);
//  System.out.println("PDSCH: " + PDSCH);
    parseModRateStandardDown = parseModRate(modRate, "downlink");
//  System.out.println("In method setStandartThroughputsTRUEDown: " + parseModRateStandardDown.get(0) + " ");
//  System.out.println("In method setStandartThroughputsTRUEDown: " + parseModRateStandardDown.get(1) + " ");
    double rate = PDSCH * Double.parseDouble(parseModRateStandardDown.get(0)) * Double.parseDouble(parseModRateStandardDown.get(1)) /
(10 * 0.001 * 1000000);
    double tmpRate = Math.round(rate * 10000);
//  System.out.println("tmpRate: " + tmpRate/10000);
    return String.valueOf(tmpRate / 10000);
}

public String setWinningBit_FrameTRUEDown(int numberOfDevice, int PDSCH, int PCFICH, int PDCCH, int PHICH, int PSS, int SSS, String
modRate) {
    double resultWinnBit = 0;

    if (numberOfDevice > 1) {
        int winPDSCH = (int) Math.ceil(PDSCH / numberOfDevice);
        int winPCFICH = (int) Math.ceil(PCFICH / numberOfDevice);
        int winPDCCH = (int) Math.ceil(PDCCH / numberOfDevice);
        int winPHICH = (int) Math.ceil(PHICH / numberOfDevice);
        int winPSS = (int) Math.ceil(PSS / numberOfDevice);
        int winSSS = (int) Math.ceil(SSS / numberOfDevice);
        int totalWinnRE = winPDSCH + winPCFICH + winPDCCH + winPHICH + winPSS + winSSS;
        parseModRateModifiedDown = parseModRate(modRate, "downlink");
        resultWinnBit = Math.ceil(totalWinnRE * Double.valueOf(parseModRateModifiedDown.get(0)) *
Double.valueOf(parseModRateModifiedDown.get(1)));
    }
//  parseModRateModifiedDown = parseModRate(modRate, "downlink");
//  int tmpResourceElement = getUsersModifiedREDown();
//  double rate = (tmpResourceElement * Double.parseDouble(parseModRateModifiedDown.get(0)) *
Double.parseDouble(parseModRateModifiedDown.get(1))) / (10 * 0.001 * 1000000);
//  double tmpRate = Math.round(rate * 10000);
//  return String.valueOf(tmpRate / 10000);
    return String.valueOf(resultWinnBit);
}

public String setStandartThroughputsTRUEUp(int PUSCH, String modRate) {
//  System.out.println("modRate: " + modRate);
    parseModRateStandardUp = parseModRate(modRate, "uplink");
//  System.out.println("parseModRateStandardUp.get(0): "+parseModRateStandardUp.get(0));
//  System.out.println("parseModRateStandardUp.get(1): "+parseModRateStandardUp.get(1));
    double rate = PUSCH * Double.parseDouble(parseModRateStandardUp.get(0)) * Double.parseDouble(parseModRateStandardUp.get(1)) / (10 *
0.001 * 1000000);
    double tmpRate = Math.round(rate * 10000);
//  System.out.println("tmpRate / 10000: " + tmpRate / 10000);
    return String.valueOf(tmpRate / 10000);
}

public String setWinnBitThroughputsTRUEUp(int numberOfDevice,int rePUSCHRS, int rePUCCH, int rePUCCHRS, int reSRS, String modRate)
{
    double resultWinnBit = 0;

    if (numberOfDevice > 1) {
        int winrePUSCHRS= (int) Math.ceil(rePUSCHRS / numberOfDevice);
        int winrePUCCH = (int) Math.ceil(rePUCCH / numberOfDevice);
        int winrePUCCHRS = (int) Math.ceil(rePUCCHRS / numberOfDevice);
        int winreSRS = (int) Math.ceil(reSRS / numberOfDevice);
        int totalWinnRE = winrePUSCHRS + winrePUCCH + winrePUCCHRS + winreSRS;
        parseModRateModifiedUp = parseModRate(modRate, "uplink");
        resultWinnBit = Math.ceil(totalWinnRE * Double.valueOf(parseModRateModifiedUp.get(0)) *
Double.valueOf(parseModRateModifiedUp.get(1)));
    }
    return String.valueOf(resultWinnBit);
//  parseModRateModifiedUp = parseModRate(modRate, "uplink");
//  int tmpResourceElement = getUsersModifiedREUp();
}

```

```

//          double rate = (tmpResourceElement * Double.parseDouble(parseModRateStandardUp.get(0)) *
Double.parseDouble(parseModRateStandardUp.get(1))) / (10 * 0.001 * 1000000);
// double tmpRate = Math.round(rate * 10000);
// return String.valueOf(tmpRate / 10000);

// setUsersModifiedREUp(numberOfDevice, PUSCH, PUSCHRS, PUCCH, PUCCHRS, SRS);
//
// int tmpResourceElement = getUsersModifiedREUp();
// double rate = (tmpResourceElement * pozModulation * kodRate) / (10 * 0.001 * 1000000);
// double tmpRate = Math.round(rate * 10000);
//
// return String.valueOf(tmpRate / 10000);
}

public ArrayList<String> parseModRate(String modRate, String directionOfTransmission) {
    String[] parseModRate = new String[2];
    String[] rateAB = new String[2];
    float kodRate = 0;
    modRate.trim();
    parseModRate = modRate.split(" ");
    if (parseModRate[1].contains("1") && parseModRate[1].length() == 1) {
        rateAB[0] = "1";
        rateAB[1] = "1";
    } else if (parseModRate[1].contains("0.5")) {
        rateAB[0] = "1";
        rateAB[1] = "2";
    } else {
        rateAB = parseModRate[1].split("/");
    }

    kodRate = (float) Integer.parseInt(rateAB[0]) / Integer.parseInt(rateAB[1]);
    if (directionOfTransmission.equals("uplink")) {
        parseModRateModifiedUp.clear();
        parseModRateStandardUp.add(String.valueOf(pozMod(parseModRate[0])));
        parseModRateStandardUp.add(String.valueOf(kodRate));
        return parseModRateStandardUp;
    } else if (directionOfTransmission.equals("downlink")) {
        parseModRateStandardDown.clear();
        parseModRateStandardDown.add(String.valueOf(pozMod(parseModRate[0])));
        parseModRateStandardDown.add(String.valueOf(kodRate));
        return parseModRateStandardDown;
    }
    return null;
}

private int pozMod(String modulation) {
    switch (modulation) {
        case "BPSK": {
            return 1;
        }
        case "QPSK": {
            return 2;
        }
        case "16QAM": {
            return 4;
        }
        case "64QAM": {
            return 6;
        }
    }
    return 0;
}

private void setSliderParametersSimulationIntensity(
    JSlider sliderSimulationIntensityM2MClass1,
    JSlider sliderSimulationIntensityM2MClass2,
    JSlider sliderSimulationIntensityM2MClass3,
    JSlider sliderSimulationIntensityM2MClass4,
    JSlider sliderSimulationIntensityUEpr1,
    JSlider sliderSimulationIntensityUEpr2,
    JSlider sliderSimulationIntensityUEpr3,
    JSlider sliderSimulationIntensityUEpr4,
    JSlider sliderSimulationIntensityUEpr5,
    JSlider sliderSimulationIntensityUEpr6,
    JSlider sliderSimulationIntensityUEpr7,
    JSlider sliderSimulationIntensityUEpr8,

```

```

        JSlider sliderSimulationIntensityUEpr9
    ) {

        arraySliderParametersSimulationIntensity.add(sliderSimulationIntensityM2MClass1);
        arraySliderParametersSimulationIntensity.add(sliderSimulationIntensityM2MClass2);
        arraySliderParametersSimulationIntensity.add(sliderSimulationIntensityM2MClass3);
        arraySliderParametersSimulationIntensity.add(sliderSimulationIntensityM2MClass4);
        arraySliderParametersSimulationIntensity.add(sliderSimulationIntensityUEpr1);
        arraySliderParametersSimulationIntensity.add(sliderSimulationIntensityUEpr2);
        arraySliderParametersSimulationIntensity.add(sliderSimulationIntensityUEpr3);
        arraySliderParametersSimulationIntensity.add(sliderSimulationIntensityUEpr4);
        arraySliderParametersSimulationIntensity.add(sliderSimulationIntensityUEpr5);
        arraySliderParametersSimulationIntensity.add(sliderSimulationIntensityUEpr6);
        arraySliderParametersSimulationIntensity.add(sliderSimulationIntensityUEpr7);
        arraySliderParametersSimulationIntensity.add(sliderSimulationIntensityUEpr8);
        arraySliderParametersSimulationIntensity.add(sliderSimulationIntensityUEpr9);
    }

    public ArrayList getSliderParametersSimulationIntensity() {
        return arraySliderParametersSimulationIntensity;
    }

    private void setFieldNetworkLoad(
        JTextField txtClass1,
        JTextField txtClass2,
        JTextField txtClass3,
        JTextField txtClass4,
        JTextField txtTotalM2M,
        JTextField txtTotalUE,
        JTextField txtTotalNumberOfDevice,
        JTextField txtSetNumberOfDevice,
        JTextField txtCorrectNumberOfM2MDevices
    ) {

        arrayFieldNetworkLoad.add(txtClass1);
        arrayFieldNetworkLoad.add(txtClass2);
        arrayFieldNetworkLoad.add(txtClass3);
        arrayFieldNetworkLoad.add(txtClass4);
        arrayFieldNetworkLoad.add(txtTotalM2M);
        arrayFieldNetworkLoad.add(txtTotalUE);
        arrayFieldNetworkLoad.add(txtTotalNumberOfDevice);
        arrayFieldNetworkLoad.add(txtSetNumberOfDevice);
        arrayFieldNetworkLoad.add(txtCorrectNumberOfM2MDevices);
    }

    public ArrayList getFieldNetworkLoad() {
        return arrayFieldNetworkLoad;
    }

    private void setSliderNetworkload(
        JSlider sliderTotalNumberOfDevice,
        JSlider sliderCorrelationUEM2M
    ) {
        arraySliderNetworkLoad.add(sliderTotalNumberOfDevice);
        arraySliderNetworkLoad.add(sliderCorrelationUEM2M);
    }

    public ArrayList getSliderNetworkLoad() {
        return arraySliderNetworkLoad;
    }

    public ArrayList getParametersSimulation(){
        return arrayParametersSimulation;
    }

    arrayFieldStandartThoughtputsDownlink.add(txtS16QAM075Down);
    arrayFieldStandartThoughtputsDownlink.add(txtS16QAM01Down);

    arrayFieldStandartThoughtputsDownlink.add(txtS64QAM075Down);
    arrayFieldStandartThoughtputsDownlink.add(txtS64QAM01Down);

    arrayFieldStandartThoughtputsDownlink.add(txtStandartThroughputsDown);
    arrayFieldStandartThoughtputsDownlink.add(txtStandartThroughputsDownMbRB);
}

    public ArrayList getFieldStandartDownlink() {
        return arrayFieldStandartThoughtputsDownlink

```

2. Програмна реалізація модифікованого алгоритму пріоритетного обслуговування черг у вузлах мережі

```
// AS_Buffer

AS_Buffer::AS_Buffer(){
    start = cur = bit_count = T1_bit_count = T2_bit_count = packet_count = 0;
    end=2;
    for(int i=0; i<10000; i++) {packets_indexer[i]=0; }
    InitializeCriticalSection(&cs1);
}

int AS_Buffer::add_packet(Packet *_packet){
    if ((bit_count>2000000000)) return 0;
    EnterCriticalSection(&cs1);

    if((end)==start-1) return 0;
    if ((end==9999)&(start==0)) return 0;
    if(end==9999) {end=0;} else {end++;}
    packets_indexer[end]=1;
    packets[end] = *_packet;
    packet_count++;
    bit_count+=_packet->size;
    if(_packet->qos==00) T1_bit_count+=_packet->size;
    if(_packet->qos==01) T2_bit_count+=_packet->size;
    LeaveCriticalSection(&cs1);
    return 1;
}

int AS_Buffer::remove_packet(){
    if (packet_count<5) return 0;
    EnterCriticalSection(&cs1);
    if((start+1)==end) return 0;
    if((start==9999)&(end==0)) return 0;
    if (start==9999) {start=0;} else {start++;}
    packets_indexer[start]=0;
    if (packet_count>0) packet_count--;
    int size = packets[start].size;
    bit_count-= size;
    if(packets[start].qos==00) T1_bit_count-=size;
    if(packets[start].qos==01) T2_bit_count-=size;
    // delete(&packets[start]);
    LeaveCriticalSection(&cs1);
    return size;
}

Packet *AS_Buffer::process_packet(){
    if (packet_count<10) return 0;
    EnterCriticalSection(&cs1);
    if((start)==end-1) return 0;
    if((start==9999)&(end==0)) return 0;
    if (start==9999) {start=0;} else {start++;}
    packets_indexer[start]=0;
    if (packet_count>0) packet_count--;
    int size = packets[start].size;
    bit_count-= size;
    if(packets[start].qos==00) T1_bit_count-=size;
    if(packets[start].qos==01) T2_bit_count-=size;
    // delete(&packets[start]);
    LeaveCriticalSection(&cs1);
    return &packets[start];
}

int Channel_Buffer::add_packet(Packet *_packet){
    if (packet_count>buf_size-10) return 0;
    if ((buffer_type==0)&(bit_count>(100000000-5120002))) return 0;
    EnterCriticalSection(&cs);
    if((end)==start-1) return 0;
    if ((end==buf_size-1)&(start==0)) return 0;
    if(end==buf_size-1) {end=0;} else {end++;}
    packets_indexer[end]=1;
    packets[end] = *_packet;
    packet_count++;
    bit_count+=_packet->size;
    if(_packet->qos==00) T1_bit_count+=_packet->size;
    if(_packet->qos==01) T2_bit_count+=_packet->size;
    LeaveCriticalSection(&cs);
    return 1; }
```

3. Імітаційна модель процесу організації наскрізного гарантування пропускної здатності каналу в концептуальній мережі мобільного зв'язку

Графічний результат виконання програмного коду

```
%% Ініціалізація змінних
clear; % очистка робочого простору
tic; % фіксація часу проведення експерименту
Tepoch=[]; %масив, у який буде записуватися початки викликів абонентів трафіку IPTV
Ttruv=[], %масив який буде записувати тривалості трансляції сервісу IPTV
Tkin=[]; %масив який буде записувати час закінчення викликів абонентів трафіку IPTV
Tepoch2=[]; %масив, у який буде записуватися початки викликів абонентів трафіку VoIP
Ttruv2=[]; %масив який буде записувати тривалості трансляції сервісу VoIP
Tkin2=[]; %масив який буде записувати час закінчення викликів абонентів трафіку VoIP
Tepoch3=[]; %масив, у який буде записуватися початки викликів абонентів трафіку VoD
Ttruv3=[]; %масив який буде записувати тривалості трансляції сервісу VoD
Tkin3=[]; %масив який буде записувати час закінчення викликів абонентів трафіку VoD
Tepoch4=[]; %масив, у який буде записуватися початки викликів абонентів трафіку WEB
Ttruv4=[]; %масив який буде записувати тривалості трансляції сервісу WEB
Tkin4=[]; %масив який буде записувати час закінчення викликів абонентів трафіку WEB
Tepoch5=[]; %масив, у який буде записуватися початки викликів абонентів трафіку CLOUD
Ttruv5=[]; %масив який буде записувати тривалості трансляції сервісу CLOUD
Tkin5=[]; %масив який буде записувати час закінчення викликів абонентів трафіку CLOUD
Tepoch6=[]; %масив, у який буде записуватися початки викликів абонентів трафіку VIDEOCONFERENCE
Ttruv6=[]; %масив який буде записувати тривалості трансляції сервісу VIDEOCONFERENCE
Tkin6=[]; %масив який буде записувати час закінчення викликів абонентів трафіку VIDEOCONFERENCE
IPTV=[]; IPTVA=0; % масив значення пропускних здатностей IPTV трафіку
VoD=[];VoDA=0; %масив значення пропускних здатностей VoD(відео за запитом) трафіку
Vidconf=[];VidconfA=0; %масив значення пропускних здатностей трафіку відеоконференцій
WEB=[];WEBA=0; %масив значення пропускних здатностей WEB трафіку
Signaling=[];SignalingA=0; %масив значення пропускних здатностей трафіку сигналізації
Voip=[];VoipA=0; %масив значення пропускних здатностей VoIP(голосу) трафіку
CLOUD=[];CLOUDA=0
%
% IPTV=[]; IPTVA=0; % масив значення пропускних здатностей IPTV трафіку
% VoD=[];VoDA=0; %масив значення пропускних здатностей VoD(відео за запитом) трафіку
% Vidconf=[];VidconfA=0; %масив значення пропускних здатностей трафіку відеоконференцій
% WEB=[];WEBA=0; %масив значення пропускних здатностей WEB трафіку 56
% Signaling=[];SignalingA=0; %масив значення пропускних здатностей трафіку сигналізації

% Voip=[];VoipA=0; %масив значення пропускних здатностей VoIP(голосу) трафіку
%% Генерація кількості абонентів, які користуються певними інфокомунікаційними послугами
% Генерація моментів поступлення та закінчення викликів
%%IPTV
Tmod=21600;%тривалість моделювання сервісу IPTV
Tepoch=[];
r = 2400;
Tepoch=[5:r:Tmod]';
N=Tmod/r;%кількість трансляцій сервісу протягом часу моделювання
for i=1:1:N
Ttr=unifrnd(1,2000,1);%тривалість викликів згенерованих за Нормальним розподілом
Ttruv=[Ttruv;Ttr];%запис згенерованих тривалостей трансляції потоку IPTV у масив
end
i=1:1:N;
Tepoch(i,2)=10;
Tkin(i,1)=Tepoch(i,1)+Ttruv(i,1); %запис моментів завершення викликів у масив
Tkin(i,2)=10;
Tepoch=sort(Tepoch);% сортування масиву початків викликів
Tkin=sort(Tkin);% сортування масиву закінчення викликів
plot(Tepoch(i,1),10,'red-',Tkin(i,1),10,'-blueo','LineWidth',2),grid;
hold on
for i=1:1:N
plot(Tepoch(i,1):Tkin(i,1),10,'-k.','LineWidth',1),grid;
end
%%VoIP
% hold on
Tmod2=18000;% тривалість моделювання сервісу VoIP
Tepoch2=[];
r2 = 2000;
Tepoch2=[40:r2:Tmod2]';
N2=Tmod2/r2;%кількість трансляцій сервісу протягом моделювання
for t=1:1:N2
Ttr2=unifrnd(1,600,1);%%тривалість викликів згенерованих за Нормальним розподілом
Ttruv2=[Ttruv2;Ttr2];%запис згенерованих тривалостей трансляції потоку VoIP у масив
end
t=1:1:N2;
Tepoch2(t,2)=0.128;
```

```

Tkin2(t,1)=Tepoch2(t,1)+Ttruv2(t,1); %запис моментів завершення викликів у масив
Tkin2(t,2)=0.128;
Tepoch2=sort(Tepoch2);% сортування масиву початків викликів
Tkin2=sort(Tkin2);% сортування масиву закінчення викликів
plot(Tepoch2(t,1),0.128,'red-',Tkin2(t,1),0.128,'-blueo','LineWidth',2),grid;
hold on
for t=1:1:N2

plot(Tepoch2(t,1):Tkin2(t),0.128,'-green.','LineWidth',2),grid;

end
%%VoD
% hold on
Tmod3=22500;%тривалість моделювання сервісу VoD
Tepoch3=[];
r3 = 2500;
Tepoch3=[20:r3:Tmod3]';
N3=Tmod3/r3;%кількість трансляції сервісу протягом моделювання
for t3=1:1:N3
Ttr3=unifrnd(1,2300,1);%%тривалість викликів згенерованих за Нормальним розподілом
Ttruv3=[Ttruv3;Ttr3];%запис згенерованих тривалостей трансляції потоку VoD у масив
end
t3=1:1:N3;
Tepoch3(t3,2)=4;
Tkin3(t3,1)=Tepoch3(t3,1)+Ttruv3(t3,1); %запис моментів завершення викликів у масив
Tkin3(t3,2)=4;
Tepoch3=sort(Tepoch3);% сортування масиву початків викликів
Tkin3=sort(Tkin3);% сортування масиву закінчення викликів
plot(Tepoch3(t3,1),4,'red-',Tkin3(t3,1),4,'-blueo','LineWidth',2),grid;
hold on
for t3=1:1:N3
plot(Tepoch3(t3,1):Tkin3(t3),4,'-m.','LineWidth',2),grid;
end
%%WEB
% hold on
Tmod4=9000;%тривалість моделювання сервісу WEB
Tepoch4=[];
r4 = 1000;
Tepoch4=[1000:r4:Tmod4]';
N4=Tmod4/r4;%кількість трансляції сервісу протягом моделювання
for t4=1:1:N4
Ttr4=unifrnd(1,500,1);%%тривалість викликів згенерованих за Нормальним розподілом
Ttruv4=[Ttruv4;Ttr4];%запис згенерованих тривалостей трансляції потоку WEB у масив
end
t4=1:1:N4;
Tepoch4(t4,2)=0.512;
Tkin4(t4,1)=Tepoch4(t4,1)+Ttruv4(t4,1); %запис моментів завершення викликів у масив
Tkin4(t4,2)=0.512;
Tepoch4=sort(Tepoch4);% сортування масиву початків викликів
Tkin4=sort(Tkin4);% сортування масиву закінчення викликів
plot(Tepoch4(t4,1),0.512,'red-',Tkin4(t4,1),0.512,'-blueo','LineWidth',2),grid;
hold on
for t4=1:1:N4
plot(Tepoch4(t4,1):Tkin4(t4),0.512,'-y.','LineWidth',2),grid;
end
%%CLOUD
% hold on
Tmod5=16200;%тривалість моделювання сервісу CLOUD
Tepoch5=[];
r5 = 1800;
Tepoch5=[500:r5:Tmod5]';
N5=Tmod5/r5;%кількість трансляції сервісу протягом моделювання
for t5=1:1:N5
Ttr5=unifrnd(1,1000,1);%%тривалість викликів згенерованих за Нормальним розподілом
Ttruv5=[Ttruv5;Ttr5];%запис згенерованих тривалостей трансляції потоку CLOUD у масив
end
t5=1:1:N5;
Tepoch5(t5,2)=12;
Tkin5(t5,1)=Tepoch5(t5,1)+Ttruv5(t5,1); %запис моментів завершення викликів у масив
Tkin5(t5,2)=12;
Tepoch5=sort(Tepoch5);% сортування масиву початків викликів
Tkin5=sort(Tkin5);% сортування масиву закінчення викликів
plot(Tepoch5(t5,1),12,'red-',Tkin5(t5,1),12,'-blueo','LineWidth',2),grid;
hold on
for t5=1:1:N5
plot(Tepoch5(t5,1):Tkin5(t5),12,'-c.','LineWidth',2),grid;
end

```

```

%%%VIDEOCONFERENCE
% hold on
Tmod6=13950;%тривалість моделювання сервісу VIDEOCONFERENCE
TPOCH6=[];
r6 = 1550;
TPOCH6=[100:r6:Tmod6]';
N6=Tmod6/r6;%кількість трансляції і сервісу протягом моделювання
for t6=1:1:N6
Ttr6=unifrnd(1,400,1);%%тривалість викликів згенерованих за Нормальним розподілом
Ttruv6=[Ttr6;Ttr6];%запис згенерованих тривалостей трансляції потоку VIDEOCONFERENCEу масив
end
t6=1:1:N6;
TPOCH6(t6,2)=2;
Tkin6(t6,1)=TPOCH6(t6,1)+Ttruv6(t6,1); %запис моментів завершення викликів у масив
Tkin6(t6,2)=2;
TPOCH6=sort(TPOCH6);% сортування масиву початків викликів
Tkin6=sort(Tkin6);% сортування масиву закінчення викликів
plot(TPOCH6(t6,1),2,'red-',Tkin6(t6,1),2,'-blueo','LineWidth',2),grid;
hold on
for t6=1:1:N6
plot(TPOCH6(t6,1):Tkin6(t6),2,'-b.','LineWidth',2),grid;
end
title('Сумарне навантаження на Wi-Fi точку інфокомунікаційними послугами ');
xlabel('Тривалість моделювання сервісу [с]');
ylabel('Необхідна пропускна здатність сервісу [Мбіт/с]')
legend('6 - VideoConf', '5 - CLOUD', '4 - WEB', '3 - VoD', '2 - VoIP', '1 - IPTV '); 59

NZ=N+N2+N3+N4+N5+N6;

ZagTPOCH=[];
ZagTPOCH=[TPOCH;TPOCH2;TPOCH3;TPOCH4;TPOCH5;TPOCH6];
n=NZ;
R = sortrows(ZagTPOCH);
T = R;
for i = 1:n
T(i,1) = R(n+1-i,1);
T(i,2) = R(n+1-i,2);
end
ZaTkin=[];
ZaTkin=[Tkin;Tkin2;Tkin3;Tkin4;Tkin5;Tkin6];
R1 = sortrows(ZaTkin);
T1 = R1;
for i = 1:n
T1(i,1) = R1(n+1-i,1);
T1(i,2) = R1(n+1-i,2);
end
krok=1; % крок перевірки присутності сеансу сервісу
y=1;
z=1;
summ=[];
mAbon=[];
Mas=[];
NEXT=[];
SUMM=[];
mAbon=0;
summ=0;
% Генерація завантаженості каналу при інтеграції Wi-fi / GSM технології інфокомунікаційними послугами
for next=0:krok:max(TPOCH3)
while (1)
if R(y,1)<=next
if R(y,2)==10
IPTVA=IPTVA+1;
summ=summ+10;
end
if R(y,2)==0.128
VoipA= VoipA+1;
summ=summ+0.128;
end
if R(y,2)==4
VoDA=VoDA+1;
summ=summ+4;
end
if R(y,2)==0.512
WEBA=WEBA+1;
summ=summ+0.512;
end
if R(y,2)==12

```

```

CLOUDA=CLOUDA+1; 60

summ=summ+12;

end
if R(y,2)==2
VidconfA=VidconfA+1;
summ=summ+2;
end
if y<NZ mAbon=mAbon+1;
end
if y<NZ y=y+1;
elsebreak;end
elsebreak;
end
end
while (1)
if R1(z,1)<=next
if R1(z,2)==10
IPTVA=IPTVA-1;
summ=summ-10;
end
if R1(z,2)==0.128
VoipA= VoipA-1;
summ=summ-0.128;
end
if R1(z,2)==4
VoDA=VoDA-1;
summ=summ-4;
end
if R1(z,2)==0.512
WEBA=WEBA-1;
summ=summ-0.512;
end
if R1(z,2)==12
CLOUDA=CLOUDA-1;
summ=summ-12;
end
if R1(z,2)==2
VidconfA=VidconfA-1;
summ=summ-2;
end
end
if z<NZ mAbon=mAbon-1;
end
if z<NZ z=z+1;
elsebreak;end
elsebreak;
end
end
IPTV=[IPTV;IPTVA];
VoD=[VoD;VoDA];
Vidconf=[Vidconf;VidconfA];
WEB=[WEB;WEBA];
Voip=[Voip;VoipA];
CLOUD=[CLOUD;CLOUDA]; 61

Mas=[Mas;mAbon];

NEXT=[NEXT;next];
SUMM=[SUMM;summ];
end
Vukl=[];
Vukl=[IPTV+VoD+Vidconf+WEB+Voip+CLOUD];

```


4. Імітаційна модель процесу завантаженості SDR фемтосоти на рівні доступу мережі користувачами технологій різного покоління мобільного зв'язку

Експериментальна частина

Код програми.

%% Ініціалізація змінних 66

clear; % очистка робочого простору

tis; % фіксація часу проведення експерименту

Stax=10000; % максимально допустима пропускна здатність, яка підтримується фемтосотою [Мбіт]

C=0; % використовується для знаходження обслуваної швидкості передавання даних через фемтосоту [Мбіт/с]

c=[]; %масив значення швидкостей, що використовується одним абонентом певного покоління зв'язку [Мбіт/с]

%% Присвоєння значень масивам даних

c=[0.000171 0.000384 2 3.1 14.4 100 1000];

%% Проведення основних розрахунків

N=100; % кількість викликів до фемтосоти від абонентів

x=[]; % масив для запису імовірностей, що випали на генераторі

cx=[]; % масив для запису розміру зайнятої пропускної здатності каналу

k=0;

Abon=[0 0 0 0 0 0]; % масив - лічильники для підрахування абонентів кожної категорії

Tproch=[]; % масив, у який буде записуватися початки викликів абонентів

Ttriv=[]; % масив який буде записуватися тривалості викликів абонентів

Tkin=[]; % масив який буде записуватися час закінчення викликів абонентів

POkaz=[]; % двовимірний масив

RO=[];

u=[];

for i=1:1:N

p=rand();

if p<0.15

C=C+c(1,1);

ro=c(1,1);

Abon(1,1)=Abon(1,1)+1;

end

if p>=0.15 && p<0.4

C=C+c(1,2);

ro=c(1,2);

Abon(1,2)=Abon(1,2)+1;

end

if p>=0.4 && p<0.6

C=C+c(1,3);

ro=c(1,3);

Abon(1,3)=Abon(1,3)+1;

end

if p>=0.6 && p<0.7

C=C+c(1,4);

ro=c(1,4);

Abon(1,4)=Abon(1,4)+1;

end

if p>=0.7 && p<0.85

C=C+c(1,5);

ro=c(1,5);

Abon(1,5)=Abon(1,5)+1;

end

if p>=0.85 && p<=0.95

C=C+c(1,6)

ro=c(1,6);

Abon(1,6)=Abon(1,6)+1;

end

if p>=0.95 && p<=1

C=C+c(1,7)

ro=c(1,7);

Abon(1,7)=Abon(1,7)+1;

end

%-----

%Генерація моментів поступлення та закінчення викликів

Tr=unifrnd(1,3600);

Ttr=poissrnd(600,1,1);

Tproch=[Tproch;Tr]; %запис згенерованих моментів поступлення викликів у масив

%Tproch=sort(Tproch); % проведення сортування моментів поступлення викликів

Ttriv=[Ttriv;Ttr];%запис згенерованих тривалостей викликів у масив

Tkin(i,1)=Tproch(i,1)+Ttriv(i,1); %запис моментів завершення викликів у масив

```

%-----
RO=[RO,ro];
x=[x;p];%запис визначених імовірностей в масив
cx=[cx;C]; % запис пропускних здатностей в масив
k=i;
%end
Pokaz(1,i)=RO(1,i);
Pokaz(2,i)=Tpoch(i,1);
end
% plot(Tpoch,RO)
%% Здійснення моделювання абонентського трафіку
Tpoch=sort(Tpoch);% сортування масиву початків викликів
Tkin=sort(Tkin);% сортування масиву закінчення викликів
krok=100; % крок перевірки присутності абонентів
y=1;
z=1;
GPRS=[]; GPRSA=0;
EDGE=[];EDGEA=0;
WCDMA=[];WCDMAA=0;
CDMA20001RevA=[];CDMA20001RevAA=0;
HSPA=[];HSPAA=0;
LTE=[];LTEA=0;
LTE1A=[];LTE1AA=0;
Mas=[];
mAbon=0;
NEXT=[];
SUMM=[]; summ=0;
for next=0:krok:max(Tkin)
while (1)
if Tpoch(y,1)<=next
if RO(1,y)==c(1,1)
GPRSA=GPRSA+1;
summ=summ+c(1,1);
end
if RO(1,y)==c(1,2) 68
EDGEA=EDGEA+1;

summ=summ+c(1,2);
end
if RO(1,y)==c(1,3)
WCDMAA=WCDMAA+1;
summ=summ+c(1,4);
end
if RO(1,y)==c(1,4)
CDMA20001RevAA=CDMA20001RevAA+1;
summ=summ+c(1,5);
end
if RO(1,y)==c(1,5)
HSPAA=HSPAA+1;
summ=summ+c(1,5);
end
if RO(1,y)==c(1,6)
LTEA=LTEA+1;
summ=summ+c(1,6);
end
if RO(1,y)==c(1,7)
LTE1AA=LTE1AA+1;
summ=summ+c(1,7);
end
if y<N mAbon=mAbon+1;
end
if y<N y=y+1;
elsebreak;end
elsebreak;
end
end
while (1)
if Tkin(z,1)<=next
if RO(1,z)==c(1,1)
GPRSA=GPRSA-1;
summ=summ-c(1,1);
end
if RO(1,z)==c(1,2)
EDGEA=EDGEA-1;
summ=summ-c(1,2);
end
end

```

```

if RO(1,z)==c(1,3)
WCDMAA=WCDMAA-1;
summ=summ-c(1,3);
end
if RO(1,z)==c(1,4)
CDMA20001RevAA=CDMA20001RevAA-1;
summ=summ-c(1,4);
end
if RO(1,z)==c(1,5)
HSPAA=HSPAA-1;
summ=summ-c(1,5);
end 69

if RO(1,z)==c(1,6)

LTEA=LTEA-1;
summ=summ-c(1,6);
end
if RO(1,z)==c(1,7)
LTEIAA=LTEIAA-1;
summ=summ-c(1,7);
end
if z<N mAbon=mAbon-1;
end
if z<N z=z+1;
elsebreak;end
elsebreak;
end
end
GPRS=[GPRS;GPRSA];
EDGE=[EDGE;EDGEA];
WCDMA=[WCDMA;WCDMAA];
CDMA20001RevA=[CDMA20001RevA;CDMA20001RevAA];
HSPA=[HSPA;HSPAA];
LTE=[LTE;LTEA];
LTEIA=[LTEIA;LTEIAA];
Mas=[Mas;mAbon];
NEXT=[NEXT;next];
y;
z;
SUMM=[SUMM;summ];
end

```

ДОДАТОК В. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

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". Радіoeлектроніка 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 "Радіoeлектроніка 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. (заочна участь, доповідь співавтора)

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.
(заочна участь, доповідь співавтора)

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. (очна участь із доповіддю)

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. (очна участь із доповіддю)

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. (заочна участь, доповідь співавтора)

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. (заочна участь, доповідь співавтора)

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. (очна участь із доповіддю)

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. (заочна участь, доповідь співавтора)

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. (очна участь із доповіддю)

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. (очна участь із доповіддю)

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. (очна участь із доповіддю)

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. (очна участь із доповіддю)

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. (заочна участь, доповідь співавтора)

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. (очна участь із доповіддю)

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. (заочна участь, доповідь співавтора)

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. (заочна участь, доповідь співавтора)

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 симпозиум "Нові технології в телекомунікація"*, с. Вишків, 2013р., с. 43 – 46. (очна участь із доповіддю)

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. (очна участь із доповіддю)