

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**БРИЧ МИКОЛА ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 621.396

**ДИСЕРТАЦІЯ  
МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ  
МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі  
(шифр і назва спеціальності)

05 «Технічні науки»  
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ /М.В. Брич/

**Науковий керівник:**  
Стрихалюк Богдан Михайлович  
доктор технічних наук, доцент

*Ідентичність всіх примірників дисертації*

**ЗАСВІДЧУЮ:**

*Вчений секретар спеціалізованої*

*вченої ради*

**/І.В. Демидов/**

**Львів – 2018**

## АНОТАЦІЯ

*Брич М.В.* Моделі та алгоритми функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі» (172 Телекомунікації та радіотехніка). – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018.

Дисертація присвячена розв'язанню актуального наукового завдання розроблення моделей та алгоритмів адаптивного використання радіочастотних ресурсів ліцензійного та неліцензійного діапазонів у мережах мобільного зв'язку за наявності кількох конкуруючих операторів зв'язку та високої гетерогенності технологій радіодоступу, типів пристроїв та вимог до параметрів якості передавання даних.

В першому розділі дисертації проведено огляд літературних джерел за темою дисертації, на підставі якого встановлено вимоги до стандартів п'ятого покоління та визначено ключові фактори, які впливають на пропускну здатність в мережах мобільного зв'язку, такі як: кількість базових станцій, доступні радіочастотні ресурси та спектральна ефективність радіоканалів.

В другому розділі роботи запропоновано удосконалений метод випадкового доступу з прослуховуванням середовища для підвищення ефективності функціонування мереж LTE у неліцензійному частотному діапазоні. Особливістю запропонованого методу є те, що він поєднує механізм випадкового доступу до радіоканалу із детермінованим розподілом каналів у мережі LTE. Це реалізується шляхом поділу підкадрів LTE на два типи: підкадр прослуховування та підкадр передавання. Ці підкадри чергуються між собою для забезпечення адаптивного використання радіочастотних ресурсів абонентами LTE, із дотриманням рівноцінних умов доступу до каналу для абонентів Wi-Fi. Запропоновано кооперативну ігрову модель з повною інформацією для спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону кількома операторами LTE. На основі запропонованої математичної моделі розроблено алгоритм адаптивної агрегації радіочастот

ліцензійного та неліцензійного діапазонів. Даний алгоритм використовує логічне розділення радіочастотного ресурсу за трьома пріоритетами доступу оператора. Найвищий пріоритет доступу оператор має у власному ліцензійному діапазоні. Наступним за пріоритетом є радіочастотний ресурс, який зарезервований для оператора у неліцензійному діапазоні. Для передавання у даному частотному діапазоні оператор LTE повинен враховувати наявність сусідніх мереж Wi-Fi, щоб забезпечити справедливість використання радіочастотних ресурсів. Найнижчим за пріоритетом доступу для оператора LTE є радіочастотний ресурс неліцензійного діапазону, який зарезервований для інших LTE операторів. Запропоновано новий метод випадкового доступу з координованим прослуховуванням середовища абонентами LTE, який базується на основі технології D2D (Device-to-Device). Технологія D2D дає змогу абонентським пристроям обмінюватись інформацією між собою без участі базової станції. Дана властивість використовується для організації абонентських груп, які координовано прослуховують середовище та приймають участь у боротьбі за доступ до радіочастотних ресурсів. При запропонованому методі функціонування з групи вибирається один вузол, який буде змагатися за доступ до неліцензійного радіочастотного діапазону. Перевагою такого підходу є те, що більшість вузлів в мережі не приймає безпосередньої участі у конкурентній боротьбі за доступ до каналу, що дає змогу використовувати значно менше часове вікно при забезпеченні достатньо малого значення ймовірності появи колізій.

У третьому розділі дисертації проведено моделювання процесу функціонування гетерогенної мережі в умовах адаптивного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону. Для визначення ефективності удосконаленого методу випадкового доступу проведено моделювання процесу обслуговування абонентів в умовах одночасного функціонування мережі LTE та мережі Wi-Fi в цільовій зоні обслуговування. Отримані результати показали перевагу запропонованого методу точки зору інтерференційних завад між мережами Wi-Fi та LTE. При використанні запропонованого методу значення SINR для абонентів LTE та Wi-Fi є вищими у

5-10 разів за рахунок зниження кількості колізій у гетерогенній мережі. Це досягається шляхом адаптації інтервалів прослуховування середовища до структури кадру LTE. Крім того, у розділі проведено моделювання гетерогенної мережі в умовах спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону трьома операторами LTE на основі запропонованої ігрової моделі розподілу радіочастотних ресурсів. Для дослідження ефективності функціонування запропонованого методу випадкового доступу з координованим прослуховуванням середовища абонентами LTE на основі технології D2D проведено моделювання на основі різних сценаріїв. Моделювання проводилось для 100 абонентів, що є типовим випадком для малих комірок у міському середовищі. Отримані результати показали, що ймовірність колізії між абонентами LTE та Wi-Fi знижується у 3 рази, для випадку груп з двох абонентів, і до 10 разів, для випадку груп з чотирьох абонентів.

Четвертий розділ роботи присвячений актуальним практичним аспектам реалізації гетерогенних мереж мобільного зв'язку на основі технології SDN. Для підвищення ефективності процесу функціонування мережі в умовах адаптивного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону запропоновано новий підхід до розподілу радіочастотних ресурсів шляхом поєднання площини управління з системою комплексного моніторингу мережі.

Загальна архітектура запропонованої системи складається з чотирьох площин: площина радіодоступу, площина ядра, площина управління і площина моніторингу. Площина радіодоступу складається з невеликих клітин і макро-клітин, точок доступу Wi-Fi і D2D (Device-to-Device) з'єднань, RRHs і т.д. Також даний рівень охоплює всю функціональність обробки сигналів, кодування даних, модуляцію та бездротову передачу останньої милі. Рівень мережі радіодоступу отримує з рівня контролю параметри конфігурації, такі як використовуваний спектр, тип модуляції, розмір комірок та планування передачі.

Площина ядра подібна до LTE-EPC (Long Term Evolution-Evolved Packet Core – довгостроковий еволюційний пакетний ресурс), але віртуалізована за

допомогою NFV. Цей рівень охоплює пакети та сервісні шлюзи, маршрутизатори та об'єкти управління мобільністю та відповідає за агрегацію трафіку з усіх базових станцій, управління мобільністю користувачів, деякі функціональні можливості AAA (Authentication, Authorization and Accounting – автентифікація, авторизація та облік) та доступ до світової мережі.

Площина управління забезпечує мережевий інтелект за допомогою вдосконалених алгоритмів балансування навантаження, спільного використання спектра, розподілу каналів тощо, використовуючи велику кількість даних для контролера SDN задля прийняття ефективних рішень щодо конфігурації мережі та відповідає за застосування інформації про поведінку мережі, щоб забезпечити ефективну конфігурацію мережі. Контролер SDN виконує балансування навантаження, переконфігурацію мережі радіодоступу та перерозподіл спектра для поліпшення продуктивності мережі та задоволення потреб користувачів.

Площина моніторингу складається з високопродуктивних серверів і баз даних, які використовуються для збирання та розбору даних і обробляє отримані дані за основою теорії бездротового зв'язку.

Запропонована структура моніторингу IoT спрямована на вдосконалення мережевої інтелектуальної інформації шляхом подання інформації з різними даними про стан мережі в текстовому чи числовому вигляді для зменшення накладних витрат сигнальних даних у порівнянні з традиційними підходами сигналізації LTE (CQI, RSSI, RSRQ тощо) та використовує протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) для збору даних. Система моніторингу розроблена таким чином, що дозволяє збирати будь-який тип даних у хмарній базі даних, як у текстовій, так і в числовій формі. Ця функція відкриває великі можливості для операторів налаштувати систему моніторингу відповідно до їх вимог у цільовій області розгортання.

На основі отриманої інформації контролер приймає рішення про управління радіочастотними ресурсами у ліцензійному та неліцензійному діапазонах, і передає цю інформацію до відповідних передавальних станцій. Перевага запропонованого рішення полягає в тому, що контролер розподіляє

ресурси з урахуванням більшої кількості параметрів, ніж може враховувати кожна базова станція окремо. Іншою перевагою є те, що використання SDN не потребує постійного прослуховування спектру усіма передавальними станціями, оскільки рішення про адаптивний розподіл спектру приймається на стороні SDN контролера. За рахунок використання зворотного зв'язку між передавальними станціями та контролером, дані про поточний стан використання неліцензійних радіочастотних ресурсів абонентами LTE та Wi-Fi постійно оновлюються в реальному масштабі часу, що дає змогу контролеру здійснювати адаптивне управління гетерогенною мережною інфраструктурою. Таким чином, централізоване управління дає змогу забезпечити ефективне спільне використання радіочастотних ресурсів не лише між різними операторами LTE, але й між різними технологіями радіодоступу.

Така парадигма процесу управління дає змогу оперувати більш повною інформацією про характеристики системи для підтримки прийняття рішень про реконфігурацію параметрів радіоінтерфейсу. Використання централізованого управління радіочастотними ресурсами дозволяє охоплювати більшу кількість комірок при розрахунку ймовірних інтерференційних завад, визначаючи таким чином більш ефективні варіанти розподілу ресурсів. Таким чином, досягається підвищення ефективності використання радіочастотних ресурсів ліцензійного та неліцензійного частотного діапазонів у гетерогенних мережах мобільного зв'язку зі складною комірковою інфраструктурою.

*Ключові слова:* гетерогенні мережі мобільного зв'язку, адаптивне використання ресурсів, 5G, програмно-керовані мережі, мобільний зв'язок.

Список публікацій здобувача:

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Strykhalyuk B. Implementation of wireless heterogeneous network based on LTE core virtualization for military communication systems / B. Strykhalyuk, I. Kahalo, M. Brych, M. Beshley, M. Seliuchenko // Системи озброєння і військова техніка. – Харків. - 2014. - С. 125-132.

2. Стрихалюк Б. М. Моделювання та тестування системи управління гетерогенної мережі доступу / Б.М. Стрихалюк, М.І. Бешлей, Г.В. Холявка, М.В. Брич // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – Київ. – 2015. – №1. - С. 22–31.

3. Maksymyuk T. Stochastic Geometry Models for 5G Heterogeneous Mobile Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, V. Pelishok // Smart Computing Review. – 2015. – Vol. 5 – №2. – P. 89-101.

4. Maksymyuk T. Fractal Modeling for Multi-Tier Heterogeneous Networks with Ultra-High Capacity Demands / T. Maksymyuk, M. Brych, I. Strykhalyuk, M. Jo. // Smart Computing Review, 2015. – Vol. 5. – №4. – P. 346-355.

5. Максимюк Т. А. Оптимізація параметрів гетерогенних мереж мобільного зв'язку на основі фрактальної геометричної моделі / Т. А. Максимюк, М. В. Брич, М. М. Климаш // Наукові записки УНДІЗ. – Київ, 2015. – № 4 (38). – С. 5-16.

6. Demydov I. The Structural-Functional Synthesis of IoT Service Delivery Systems by Performance and Availability Criteria / Ivan Demydov, Yulia Klymash, Mykola Brych, Mykhailo Klymash // Internet of Things (IoT) and Engineering Applications (Canada). – May, 2017. – Vol. 2. – Issue 1. – P. 1-13.

7. Масюк А. Р. Алгоритм інтелектуального вертикального хендоверу в гетерогенній мобільній мережі на основі хмарних обчислень / А.Р. Масюк, І.Б. Стрихалюк, М. В. Брич, І. О. Кагало, Г. В. Бешлей // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2017. - № 874. - С. 110–121.

8. Максимюк Т. А. Моделі стохастичної геометрії для гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління / Т. А. Максимюк, Р. А. Бурачок, І.Б. Чайковський, М. В. Брич // Комп'ютерні технології друкарства. – Львів, 2015. – № 33. – С. 112-119.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

9. Maksymyuk T. Fractal Geometry Based Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, A. Masyuk // Proceedings of

international conference IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2015), (Kharkiv, October 13-15, 2015). – Kharkiv, Ukraine, 2015 – P. 69-72.

10. Krasko O. Flexible backhaul architecture for densely deployed 5G small cells based on OWTDMA network / O. Krasko, M. Brych, A. Masyuk, M. Klymash // Проблеми інфокомунікацій. Наука і технології: Матеріали 3-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 4-6 жовтня 2016 р.). – 2016. – P. 33–35.

11. Demydov I. Mobility management and vertical handover decision in an always best connected heterogeneous network / I. Demydov, M. Seliuchenko, M. Beshley, M. Brych // 14th International Conference on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), (Lviv-Poljana, Ukraine February 24-27, 2015) – Lviv Polytechnic Publishing House, 2015 – P.103-105.

12. Maksymyuk T. An IoT based monitoring framework for software defined 5G mobile networks/ T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Brych, D. Satria, M. Jo // ACM IMCOM 2017: Proceedings (January 5–7, 2017, Beppu, Japan). – 2017. – P. 105.

13. Maksymyuk T. Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network/ T.Maksymyuk, M.Brych, M. Klymash, M. Jo // 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), (Lviv, Ukraine, July 4-7, 2017) – Lviv Polytechnic Publishing House, 2017. – P.197-200.

14. Maksymyuk T. Game Theoretical Framework for Multi-Operator Spectrum Sharing in 5G Heterogeneous Networks/ T. Maksymyuk, M. Brych, Y. Klymash, M. Kyryk, M. Klymash // Proceedings of international conference IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2017), (Kharkiv, October 10-13, 2017). – Kharkiv, Ukraine, 2017. – P. 515-518.

15. Максимюк Т. А. Метод синтезу OFDM сигналу на основі вейвлетних функцій / Т. А. Максимюк, С. С. Думич, М. В. Брич // П'ятнадцята відкрита науково-технічна конференція Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та



електронної техніки з проблем електроніки та інфокомунікаційних систем, (Львів, 3-6 квітня 2012 р.) – Львів, 2012. – С. 81.

16. Максимюк Т. А. Підвищення спектральної ефективності радіосистем з ортогональним частотним розділенням / Т. А. Максимюк, С. С. Думич, М. В. Брич // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми телекомунікацій – 2012" (Київ, 24-27 квітня 2012 р.) – Київ, 2012. – С. 207-209.

17. Максимюк Т. А. Підвищення завадостійкості сигнальних конструкцій в системах з ортогональним частотним мультиплексуванням / Т. А. Максимюк, В. О. Пелішок, А. Т. Ратич, М. В. Брич // Матеріали науково-методичної конференції "Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2012" (Львів, 1-4 листопада 2012 р.) – Львів, 2012. – С.41-44.

18. Krasko O.V. Dynamic Bandwidth Allocation for 5G Optical Backhaul Networks with Wavelength Division Multiplexing / Krasko O.V., Brych M.V., Al-Anssari A., Qasim N. // International Scientific-Practical Conference "Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication," Nov. 9-11, 2017, Chernivtsi, Ukraine, P. 110-111.

## ABSTRACT

*Brych M.V.* Models and algorithms of heterogeneous mobile networks operation. – Proficiency scientific treatise on the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the Candidate of Engineering Science (PhD) degree in technical sciences on specialty 05.12.02 – «Telecommunication Systems and Networks» (172 - Telecommunications and Radio Engineering). – Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis is devoted to solving the actual scientific problem of developing the models and algorithms for adaptive utilization of licensed and unlicensed spectrum resources by LTE mobile networks in the presence of several competing network operators and high heterogeneity of radio access technologies, device types and

parameters of data transmission quality. The current state and state-of-the-art trends in 5G mobile networks development have been analyzed in details. Existing cellular networks are evolving rapidly towards 5G designing paradigm. Next generation cellular networks are more heterogeneous in terms of coverage planning, radio access technologies and spectrum bands. Most of the existing solutions proposed for 5G design are pursuing the same goal of increasing the bandwidth per single user while increasing the number of simultaneous users as well. The key constraints of the network capacity have been identified, such as spectrum scarcity, problems of spectrum allocation and licensing of the wireless communication standards in Ukraine, absence of a unified management platform for a heterogeneous network infrastructure, etc.

One way is to improve the radio access technology that will result in a higher spectral efficiency, i.e. less bandwidth will provide the same throughput. Many solutions have been proposed to achieve higher spectral efficiency so far, but they can provide only 10-20% of improvement in terms of overall spectral efficiency.

Alternative and more effective solution is to use the heterogeneous topology of a cellular network with multiple tiers of coverage such as macro, micro, picocells. This approach can provide from 50 to 300% of improvement in spectral efficiency, which is paid by higher complexity of the topology design, interference coordination and network management.

Further improvement is also possible by using carrier technology, which allows to combine the bandwidth of several channels to provide higher throughput for the users. Finally, the use of additional bands in unlicensed 5 GHz spectrum is currently considered to add the large portion of bandwidth for mobile networks. This approach is called LTE in unlicensed spectrum (LTE-U). The main problem, which has to be solved in this case, is to ensure the fair coexistence between LTE-U and Wi-Fi in the same spectrum.

To alleviate these above mentioned issues, several solutions to improve the future 5G mobile network infrastructure have been proposed in this thesis. First of all, the method of carrier sense multiple random access has been further developed to adjust media access control to the LTE frame structure. This solution enables the

adaptive utilization of unlicensed radio frequency resources to increase the total throughput of the heterogeneous mobile network. So far, there are few approaches based on listen-before-talk and licensed assisted access, which aim to avoid interference between LTE-U and Wi-Fi. Utilization of unlicensed bands for primary transmission leads to sufficient decreasing of users' experience due to interference problem. We assume that using unlicensed band with carrier aggregation scenario will show better performance comparing to primary utilization. Therefore, we develop the scenario when user aggregates throughput from licensed and unlicensed bands simultaneously. Herewith, data that requires low errors, signaling data and the voice data are still transmitted over the licensed spectrum band, while unlicensed band is used to boost throughput for data hungry applications, which allow some packet losses. We propose an approach of dual-subframe allocation, where one subframe is transmitted over licensed band, while other frame is transmitted over unlicensed band. Subframes allocation is carried out by assistance from SDN controller, to avoid interference to Wi-Fi networks. We assume that Wi-Fi networks do not interfere with LTE-U due to channel sensing before transmission by using CSMA protocol.

Due to the variable network load and different user demands it is not necessary for mobile network operator to use unlicensed spectrum permanently. Unlicensed spectrum may be used only to boost the network capacity for a short time when necessary. Therefore, to reduce the probability of simultaneous transmission in unlicensed spectrum by multiple network operators we propose to logically divide the entire unlicensed spectrum between them. In this case, each operator gets the permission to transmit data only in a part of unlicensed spectrum, while avoid transmission in a rest of unlicensed band. Thus, mobile network operators can deploy the LTE-U coverage, while avoid interference among them.

A new game theoretical framework for licensed and unlicensed spectrum sharing by multiple mobile network operators has been proposed. The novelty of proposed model is that it takes into account not only coexistence between LTE and Wi-Fi, but also between multiple LTE networks. The novelty of this model is in the new game theoretical framework with proportional payoff distribution among the

operators by calculation of the Shapley value, which prevents their selfish behavior. In the proposed framework, Shapley value determines how much spectrum should be allocated for each mobile network operator depends on their payoffs. High payoff means that spectrum utilization is close to the initial spectrum allocation. Low payoff means that network operator allocates much more or less spectrum than is actually required. The key advantage of this approach is in the flexibility to the traffic fluctuation within internal operator's network.

Proposed model takes into account the instantaneous bandwidth demand of the operator, which enables the increasing of the spectrum utilization efficiency in conditions of simultaneous operation of multiple LTE operators in the unlicensed spectrum. Further in this thesis, a new approach for cooperative spectrum sensing for the scenario of device-to-device assisted cellular network. The main idea of this approach is to reduce the number of total spectrum sensing attempts for each user by enabling their cooperation in clusters via device-to-device communication. Each cluster is formed by two or more devices in the vicinity of each other, which sense the carrier occupancy alternately and share the obtained information with other cluster members. Thus, the number of sensing attempts is decreased proportionally to the number of users in a single cluster. To further improve the bandwidth utilization, cluster members configure the size of contention window to minimize the idle time between their access to the unlicensed channel.

The advantage of SDN is that the main controller is able to determine the best spectrum allocation between multiple operators depends on the variable conditions of the cellular network such as number of users, traffic demands and probability of interference. To improve the intelligence of SDN, much more parameters should be taken into account such as traffic statistic for each cell, service requirements for each user, efficiency of spectrum utilization, signal quality indicators of each user and many others. All these data should be acquired in real-time, stored for a long period and analyzed in a proper way. Combination of current and previous data allows to create a comprehensive knowledge on network functionality and performance. Therefore, in this thesis we propose new approach for monitoring the 5G mobile network with high scalability, good interoperability, and low overhead.

The general architecture of the proposed system consists of four planes: radio access network (RAN), core, control and knowledge. RAN plane is responsible for “last mile” wireless access for end users. Core plane provides the functions of quality assurance, billing and secured access. All functional elements of network core are virtualized in a cloud by using NFV (Network Function Virtualization) technology. Control plane consists of SDN controller (or multiple SDN controllers), which is responsible for spectrum management, load balancing, traffic routing, mobility management and coverage planning by applying available knowledge on 5G network state. In this paper, we introduce the additional knowledge plane that is responsible for knowledge creation and management by using context aware data analytics. We also introduce an IoT monitoring framework for data acquisition from each network plane. The IoT framework collects data from network units (i.e. things) and provides these data to the knowledge plane.

RAN plane consists of small cells and macro cells, Wi-Fi access points and D2D (Device-to-Device) connections. This plane encompasses all the functionality of signal processing, data encoding and modulation, users scheduling and wireless transmission. However, in difference to conventional mobile network, in software defined mobile network all complicated computing tasks are not performed by each node independently. Instead, control plane decides the configuration of all transmitters such as user spectrum, type of modulation and transmission scheduling.

Core plane is very similar to the LTE-EPC (Long Term Evolution-Evolved Packet Core). It encompasses the packet and service gateway, edge routers and mobility management entities. Core plane is intermediate between control plane and RAN plane, and it is responsible for traffic aggregation from all the base stations, mobility management of users and some functionality of AAA (authentication, authorization and accounting). Moreover, this plane is also interacting with other public networks to provide access to the world area network (WAN).

The main responsibility of control plane is to provide network intelligence by using advanced algorithms of load balancing, spectrum sharing, channels allocation, etc. The complexity of network management is in the large amount of data, which are needed for SDN controller to make effective decisions on network configurations. In

order to acquire the data on network condition, it is necessary to monitor all network nodes simultaneously including both network side equipment and user side equipment. This is quite a complex problem, because conditions in mobile network are rapidly variable due to high mobility of users. Control plane is intermediate between knowledge plane and core plane. The main responsibilities of control plane are to apply the knowledge on network behavior and effective configuration obtained from knowledge plane by SDN controller. According to the gained knowledge, SDN controller performs load balancing, RAN reconfiguration and spectrum reallocation in order to improve the network performance and satisfy users experience.

Knowledge plane consists of high-performance servers and databases, which are used to collect the data. The important function of knowledge plane is not only to collect the data, but also to process these data according to the fundamentals of wireless communication theory. For example, knowledge plane is able to detect when network performance are becoming worse when something changes in the channels allocation, severe interference appears or some cells are facing traffic overloads. Our proposed IoT monitoring framework are aimed to improve the network intelligence by feeding the knowledge plane with variety of data from network monitoring and reducing the overhead of monitoring data compared to conventional monitoring approaches.

*Key words:* heterogeneous mobile networks, adaptive spectrum utilization, 5G software-defined networks, mobile communications.

The list of author's publications:

*Proceedings where basic scientific results of thesis are published:*

1. Strykhalyuk B. Implementation of wireless heterogeneous network based on LTE core virtualization for military communication systems / B. Strykhalyuk, I. Kahalo, M. Brych, M. Beshley, M. Seliuchenko // Arms systems and military equipment. – Kharkiv. - 2014. - P. 125-132.

2. Strykhalyuk B. M. Modeling and testing of a heterogeneous network access control system / B.M. Strykhalyuk, M.I. Beshley, H.V. Kholiavka, M.V. Brych// Telecommunication and information technologies. – Kyiv. – 2015. - №1. – P. 22–31.

3. Maksymyuk T. Stochastic Geometry Models for 5G Heterogeneous Mobile Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, V. Pelishok // Smart Computing Review. – 2015. – Vol. 5 – №2. – P. 89-101.

4. Maksymyuk T. Fractal Modeling for Multi-Tier Heterogeneous Networks with Ultra-High Capacity Demands / T. Maksymyuk, M. Brych, I. Strykhalyuk, M. Jo. // Smart Computing Review, 2015. – Vol. 5. – №4. – P. 346-355.

5. Maksymyuk T. A. Optimization of parameters of mobile communication heterogeneous networks on the basis of fractal geometric models / T. A. Maksymyuk, M. V. Brych, M. M. Klymash // Scientific notes of the UNDIZ. – Kyiv, 2015. – № 4 (38). – P. 5-16.

6. Demydov I. The Structural-Functional Synthesis of IoT Service Delivery Systems by Performance and Availability Criteria / Ivan Demydov, Yulia Klymash, Mykola Brych, Mykhailo Klymash // Internet of Things (IoT) and Engineering Applications (Canada). – May, 2017. – Vol. 2. – Issue 1. – P. 1-13.

7. Masiuk A. R. Intellectual Vertical Handover Algorithm in Heterogeneous Mobile Network Based on Cloud Technology / A. R. Masiuk, I.B. Strykhalyuk, M. V. Brych, I. O. Kahalo, H. V. Beshley // Radio Electronics and Telecommunications / Ed. B.A. Mandziy. – Lviv.: Lviv Polytechnic Publishing House. – 2017. - № 874. - P. 110–121.

8. Maksymyuk T. A. Models of stochastic geometry for heterogeneous 5th generation mobile communication networks / T. A. Maksymyuk, R.A. Burachok, I.B. Chaikovskiy, M. V. Brych // Computer printing technologies. – Lviv, 2015. – № 33. – P. 112-119.

*Proceedings that certify an approvement of thesis:*

9. Maksymyuk T. Fractal Geometry Based Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, A. Masyuk // Proceedings of international conference IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2015), (Kharkiv, October 13-15, 2015). – Kharkiv, Ukraine, 2015 – P. 69-72.

10. Krasko O. Flexible backhaul architecture for densely deployed 5G small cells based on OWTDMA network / O. Krasko, M. Brych, A. Masyuk, M. Klymash // Problems of infocommunications. Science and Technology: Materials of the 3rd International Scientific and Practical Conference (Kharkiv, 4-6 October, 2016). – 2016. – P. 33–35.

11. Demydov I. Mobility management and vertical handover decision in an always best connected heterogeneous network / I. Demydov, M. Seliuchenko, M. Beshley, M. Brych // 14th International Conference on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), (Lviv-Poljana, Ukraine February 24-27, 2015) – Lviv Polytechnic Publishing House, 2015 – P.103-105.

12. Maksymyuk T. An IoT based monitoring framework for software defined 5G mobile networks/ T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Brych, D. Satria, M. Jo // ACM IMCOM 2017: Proceedings (January 5–7, 2017, Beppu, Japan). – 2017. – P. 105.

13. Maksymyuk T. Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network/ T.Maksymyuk, M.Brych, M. Klymash, M. Jo // 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), (Lviv, Ukraine, July 4-7, 2017) – Lviv Polytechnic Publishing House, 2017. – P.197-200.

14. Maksymyuk T. Game Theoretical Framework for Multi-Operator Spectrum Sharing in 5G Heterogeneous Networks/ T. Maksymyuk, M. Brych, Y. Klymash, M. Kyryk, M. Klymash // Proceedings of international conference IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2017), (Kharkiv, October 10-13, 2017). – Kharkiv, Ukraine, 2017. – P. 515-518.

15. Maksymyuk T. A. Method of OFDM based signal synthesis on the basis of wavelet functions / T. A. Maksymyuk, S. S. Dumych, M.V. Brych // Fifteenth Open Scientific and Technical Conference of the Institute of Telecommunications, Radioelectronics and Electronic Technology on the Problems of Electronics and Infocommunication Systems, (Lviv, 3-6 of October, 2012) – Lviv, 2012. – P. 81.

16. Maksymyuk T. A. Increasing of spectral efficiency of radio systems with orthogonal frequency division / T. A. Maksymyuk, S. S. Dumych, M.V. Brych //



Materials of the international scientific and technical conference "Problems of telecommunications - 2012" (Kyiv, 24-27 of April, 2012) – Kyiv, 2012. – P. 207-209.

17. Maksymyuk T. A. Increasing a noise immunity of signal structures in systems with orthogonal frequency multiplexing / T. A. Maksymyuk, V.O. Pelishok, A. T. Ratych, M. V. Brych // Materials of the scientific and methodical conference "Modern problems of telecommunications and training of specialists in the field of telecommunications - 2012" (Lviv, 1-4 of November, 2012) – Lviv, 2012. – P. 41-44.

18. Krasko O.V. Dynamic Bandwidth Allocation for 5G Optical Backhaul Networks with Wavelength Division Multiplexing / Krasko O.V., Brych M.V., Al-Ansari A., Qasim N. // International Scientific-Practical Conference "Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication," Nov. 9-11, 2017, Chernivtsi, Ukraine, P. 110-111.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	21
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТА ВИМОГ ДО ЇХ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ .....	27
1.1. Перспективи розвитку гетерогенних мереж мобільного зв'язку .....	27
1.2. Сучасний стан розподілу спектру для гетерогенних мереж мобільного зв'язку .....	31
1.3. Аналіз основних невирішених завдань для забезпечення ефективного функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку .....	35
1.3.1. Спільне використання спектру кількома операторами мобільного зв'язку .....	35
1.3.2. Використання неліцензійного спектру для мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління .....	38
1.3.3. Розроблення алгоритмів самоорганізації складної гетерогенної інфраструктури мережі мобільного зв'язку .....	40
1.4. Висновки до розділу .....	45
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ АДАПТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ РАДІОЧАСТОТНИХ РЕСУРСІВ В ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ .....	47
2.1. Архітектура гетерогенної мережі мобільного зв'язку з кількома рівнями покриття .....	47
2.2. Використання неліцензійного частотного діапазону в гетерогенних мережах мобільного зв'язку .....	51

2.2.1. Агрегація каналів LTE та Wi-Fi підвищення пропускної здатності мережі	55
2.2.2. Агрегація каналів LTE у ліцензійному та неліцензійному частотному діапазоні	57
2.3. Модифікований метод випадкового доступу до неліцензійного частотного діапазону	60
2.4. Модель спільного використання радіочастотних ресурсів при розгортанні мереж LTE кількома операторами у неліцензійному частотному діапазоні	65
2.5. Метод агрегації радіочастотних ресурсів ліцензійного та неліцензійного діапазонів	69
2.6. Метод координованого прослуховування середовища абонентами LTE на основі формування D2D груп	74
2.7. Висновки до розділу	78

<b>РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РАДІОЧАСТОТНИХ РЕСУРСІВ У ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ</b>	<b>79</b>
3.1. Дослідження пропускної здатності гетерогенних мереж мобільного зв'язку	79
3.2. Експериментальне дослідження стану зайнятості радіочастотних ресурсів в неліцензійному частотному діапазоні	90
3.3. Моделювання методу адаптивного використання радіочастотних ресурсів в гетерогенних мережах LTE/Wi-Fi	98
3.4. Моделювання процесу спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону кількома операторами LTE	101

3.5. Моделювання методу випадкового доступу з координованим прослуховуванням середовища на основі технології D2D .....	103
3.6. Моделювання алгоритму агрегації частотних діапазонів в ліцензійному та неліцензійному спектрі.....	104
3.7. Висновки до розділу .....	108
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ	
МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ З ПРОГРАМНИМ УПРАВЛІННЯМ	
РАДІОЧАСТОТНИМИ РЕСУРСАМИ .....	
4.1. Практичні аспекти впровадження гетерогенних мереж мобільного зв'язку.....	109
4.2. Багаторівнева архітектура гетерогенної програмно-конфігурованої мережі .....	112
4.3. Управління параметрами гетерогенної мережі на основі технології SDN.....	119
4.4. Практичні аспекти розгортання LTE в неліцензійному частотному діапазоні .....	125
4.5. Висновки до розділу .....	131
ВИСНОВКИ.....	132
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	136
ДОДАТОК 1. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ.....	155
ДОДАТОК 2. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ	
ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ	
ДИСЕРТАЦІЇ .....	158

## ВСТУП

Стрімкий розвиток технологій спричиняє зростання обчислювальних можливостей кінцевих пристроїв абонентського доступу, стимулюючи таким чином появу нових видів послуг у мережах мобільного зв'язку, які не були можливими раніше. Як наслідок, це призводить до значного зростання вимог до пропускної здатності мереж мобільного зв'язку. Тому, розвиток мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління є важливим завданням в Україні та світі. Особливості розподілу радіочастотного ресурсу між різними провайдером мобільного зв'язку та безпроводними радіорелейними системами військового призначення в Україні призвели до нестачі вільних частотних ресурсів для ефективного впровадження мереж стандарту LTE в масштабах держави. Таким чином, постає нове завдання пошуку нових методів розгортання мереж LTE, у тому числі у неліцензійних частотних діапазонах, а також розроблення адаптивних методів управління, які б забезпечили належне функціонування мереж LTE в умовах нестачі радіочастотного ресурсу. Зокрема, в останні роки активно ведуться дослідження у напрямку розробки мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G), які покликані підвищити гнучкість процесу управління радіочастотними ресурсами для підвищення ефективності їх використання. Для досягнення поставлених цілей запропонована концепція гетерогенних мереж, яка полягає у використанні додаткових шарів покриття малих комірок у поверх існуючого покриття макрокомірки. Таким чином, гетерогенні мережі частково вирішують завдання підвищення пропускної здатності мережі в умовах обмеженого спектру за рахунок збільшення доступної частотної смуги на одиницю площі. Тому, гетерогенні мережі розглядаються як один з основних елементів для переходу до мереж мобільного зв'язку 5G.

Проблематика підвищення ефективності мереж мобільного зв'язку активно досліджувались такими провідними українськими та зарубіжними вченими як М.М. Климаш, Л.Н. Беркман, А.І. Семенко, С. Г. Бунін, І. П. Лісовий,

К. С. Сундучков, В.М. Безрук, Л. С. Глоба, В.О. Пелішок, Ю. Ю. Коляденко, А.О. Макаренко, M. Jo, H. Hwa-Chen, X. Ge, C. Cho, M. Dohler, M. Haenggi, A.L.F. de Almeida та багатьма іншими.

Незважаючи на велику кількість різноманітних рішень для підвищення ефективності гетерогенних мереж мобільного зв'язку, невирішеними досі залишаються задачі адаптивного використання радіочастотних ресурсів, при наявності великої кількості конкуруючих технологій радіодоступу, координованого використання радіочастотних ресурсів кількома операторами зв'язку, а також задачі адаптивної агрегації радіочастотних ресурсів для підвищення пікової пропускної здатності у гетерогенних мережах мобільного зв'язку.

Таким чином, необхідність суттєвого підвищення пропускної здатності мережі мобільного зв'язку в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу є невирішеним на сьогодні протиріччям у світовій та вітчизняній науці. Тому, потребує вирішення науково-практична задача розроблення моделей та алгоритмів адаптивного використання радіочастотних ресурсів ліцензійного та неліцензійного діапазонів у мережах мобільного зв'язку за наявності кількох конкуруючих операторів зв'язку та високої гетерогенності технологій радіодоступу, типів пристроїв та вимог до параметрів якості передавання даних.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційних досліджень відповідає науковому напрямку кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» - «Інфокомунікаційні системи та мережі». Дисертаційна робота виконана в межах держбюджетних науково-дослідних робіт: «Методи побудови та моделі інформаційно – телекомунікаційної інфраструктури на основі SDN – технологій для систем електронного урядування» (ДБ/SDN), (2015-2016), № держреєстрації 0115U000444, «Методи побудови гетерогенних інформаційно-

комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (ДБ/5G), (2017–2019 рр.), № держреєстрації 0117U004449, «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні» (ДБ/LTE-U), (2017-2019), № держреєстрації 0117U007177, які виконувались за участі здобувача у Національному університеті «Львівська політехніка».

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення пропускної здатності гетерогенних мереж мобільного зв'язку в умовах адаптивного використання радіочастотного ресурсу кількома операторами зв'язку та технологіями радіодоступу.

В межах дисертаційних досліджень сформульовано та розв'язано такі завдання, як:

1. Аналіз стану та тенденцій розвитку гетерогенних мереж мобільного зв'язку для визначення основних факторів, які впливають на їх пропускну здатність.

2. Удосконалення методів адаптивного використання радіочастотних ресурсів в мережах мобільного зв'язку з прослуховуванням середовища для розгортання мереж LTE у неліцензійному частотному діапазоні.

3. Розроблення моделей спільного використання радіочастотних ресурсів при розгортанні мереж LTE кількома операторами мобільного зв'язку в неліцензійному частотному діапазоні.

4. Розроблення методів координованого випадкового доступу абонентами LTE для підвищення ефективності використання неліцензійних радіочастотних ресурсів за рахунок зниження кількості колізій між мережами LTE та Wi-Fi.

5. Розроблення удосконалених підходів до управління ресурсами на основі архітектури програмно-керованих мереж для підвищення ефективності використання радіочастотних ресурсів ліцензійного та неліцензійного

частотного діапазонів у гетерогенних мережах мобільного зв'язку зі складною комірковою інфраструктурою.

6. Моделювання та дослідження показників ефективності функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку із використанням запропонованих методів, моделей та алгоритмів.

**Об'єктом дослідження** є процес передавання даних у мережах мобільного зв'язку з адаптивним використанням радіочастотних ресурсів.

**Предметом дослідження** є методи та моделі адаптивного використання радіочастотних ресурсів у гетерогенних мережах мобільного зв'язку.

**Методи дослідження.** В процесі досліджень використано основи теорії сигналів, теорії ймовірності та математичної статистики, теорію ігор, методи аналітичного та імітаційного моделювання.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Отримав подальший розвиток метод випадкового доступу з прослуховуванням середовища шляхом його адаптації до структури кадру LTE на каналному рівні, що дало змогу підвищити сумарну пропускну здатність гетерогенної мережі мобільного зв'язку за рахунок адаптивного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів.

2. Вперше запропоновано модель спільного використання радіочастотних ресурсів кількома операторами мобільного зв'язку на основі теорії ігор, яка, на відміну від існуючих, враховує поточні потреби оператора у пропускній здатності, що дає можливість підвищити ефективність використання ресурсів в умовах одночасного функціонування мереж LTE різних операторів у неліцензійному частотному діапазоні.

3. Вперше запропоновано метод випадкового доступу з координованим прослуховуванням середовища абонентами LTE, який, на відміну від відомих, групує абонентів у D2D кластери, що дає змогу знизити рівень інтерференційних завад у гетерогенній мережі мобільного зв'язку за рахунок



зменшення кількості колізій між абонентами LTE у неліцензійному частотному діапазоні.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у можливості їх безпосереднього застосування для підвищення ефективності існуючих та перспективних гетерогенних мереж мобільного зв'язку. А саме:

1. Розроблено алгоритм адаптивного використання неліцензійних частотних каналів абонентами LTE, який знизив рівень інтерференційних завад між абонентами LTE та Wi-Fi у неліцензійному частотному діапазоні, що дало змогу підвищити співвідношення сигнал/шум для абонентів від 10 до 15 дБ.

2. Розроблено алгоритм адаптивної агрегації радіочастот ліцензійного та неліцензійного діапазонів, який дає змогу вдвічі підвищити пікову пропускну здатність для абонентів гетерогенної мережі мобільного зв'язку.

3. Запропоновано алгоритм адаптивного вибору часового вікна для методу випадкового доступу з координованим прослуховуванням середовища, який дає змогу знизити кількість колізій до 10 разів, шляхом використання ортогональних значень адаптивного часового вікна для окремих D2D груп.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати, подані у дисертації одержані здобувачем особисто. У працях опублікованих у співавторстві авторів належать: у роботах [1, 9, 10] – модель адаптивного розгортання мережі LTE в неліцензійному частотному діапазоні; [3, 4, 5, 8, 15, 16, 17] – методика розрахунку інтерференційних завад при плануванні покриття мережі LTE; [2, 6, 7, 10, 11, 18] – розроблення імітаційних моделей для дослідження мережі; [12] – система моніторингу мережі на основі програмно-конфігурованої архітектури; [13] – метод випадкового доступу з координованим прослуховуванням середовища абонентами LTE, [14] – ігрова модель спільного використання радіочастотних ресурсів операторами LTE.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати наукових досліджень доповідалися та обговорені на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях: Основні результати наукових досліджень

доповідалися та обговорювалися на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях: «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій» (Львів, 2012), «П'ятнадцята відкрита науково-технічна конференція Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки з проблем електроніки та інфокомунікаційних систем» (Львів, 3-6 квітня 2012 р.), «Проблеми телекомунікацій» (Київ, 24-27 квітня 2012 р.), «IEEE Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics» (Поляна-Свалява, 2015), «IEEE Problems of Infocommunications.Science and Technology» (Харків, 2015, 2016, 2017), IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (м. Львів, 2017), "Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication" (м. Чернівці, 2017). Також результати роботи обговорені на засіданнях та семінарах кафедри телекомунікацій.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових праць, серед них: статей у періодичних фахових виданнях – 8 [1-8], з них в журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз – 7, у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій – 10 [9-18].

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку. Загальний обсяг роботи становить 160 сторінок друкарського тексту, в тому числі 7 сторінок вступу, 105 сторінок основного тексту, 56 рисунків, 5 таблиць, список використаних джерел зі 155 найменувань, 2 додатки.

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТА ВИМОГ ДО ЇХ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ

## 1.1. Перспективи розвитку гетерогенних мереж мобільного зв'язку

На сьогоднішній час в Україні та світі спостерігається стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій з метою переходу до світових стандартів та впровадження новітніх технологій, таких як мережі 4G/5G, Інтернет речей та хмарні обчислення [20-29]. Відповідно до Указу Президента України від 21.07.2015 № 445 «Про забезпечення умов для впровадження системи мобільного зв'язку четвертого покоління» та Плану заходів щодо впровадження системи мобільного зв'язку четвертого покоління, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 11.11.2015 № 1232-р., зазначається про необхідність проведення заходів для ефективного використання радіочастотного ресурсу та створення правових засад для проведення рефармінгу частотних діапазонів. Поточна ситуація із розвитком мобільного зв'язку Україні є доволі неоднозначною. Велика трійка операторів інвестувала значні фінансові ресурси для впровадження мереж покоління 3G. Тим не менш, повноцінний запуск мереж мобільного зв'язку 3G в Україні відбувся лише у 2015 році, що на 10 років пізніше, ніж у більшості країн Європи. Запуск мереж 4G в Україні очікується у 2018 році, що на 7-8 років пізніше ніж, у країнах Європи. Враховуючи, що на сьогоднішній час, ряд мобільних операторів у світі вже готується до комерційного запуску мереж 5G, найбільш доцільним рішенням для українських операторів є побудова мережної інфраструктури із значним запасом подальшої масштабованості, з метою переходу до стандартів 5G в короткостроковій перспективі. Це в свою чергу потребує значного збільшення спектральних ресурсів мережі, оскільки для забезпечення зростаючих вимог до пропускної здатності необхідні значно більші частотні смуги. Одним із варіантів підвищення пропускної здатності мережі мобільного зв'язку в умовах обмеженого спектру є перехід до

гетерогенної мережної інфраструктури та введення нових частотних діапазонів для розгортання мереж мобільного зв'язку. На рис. 1.1. представлено класифікацію потенційних технічних рішень для підвищення сумарної пропускної здатності мережі мобільного зв'язку [30].

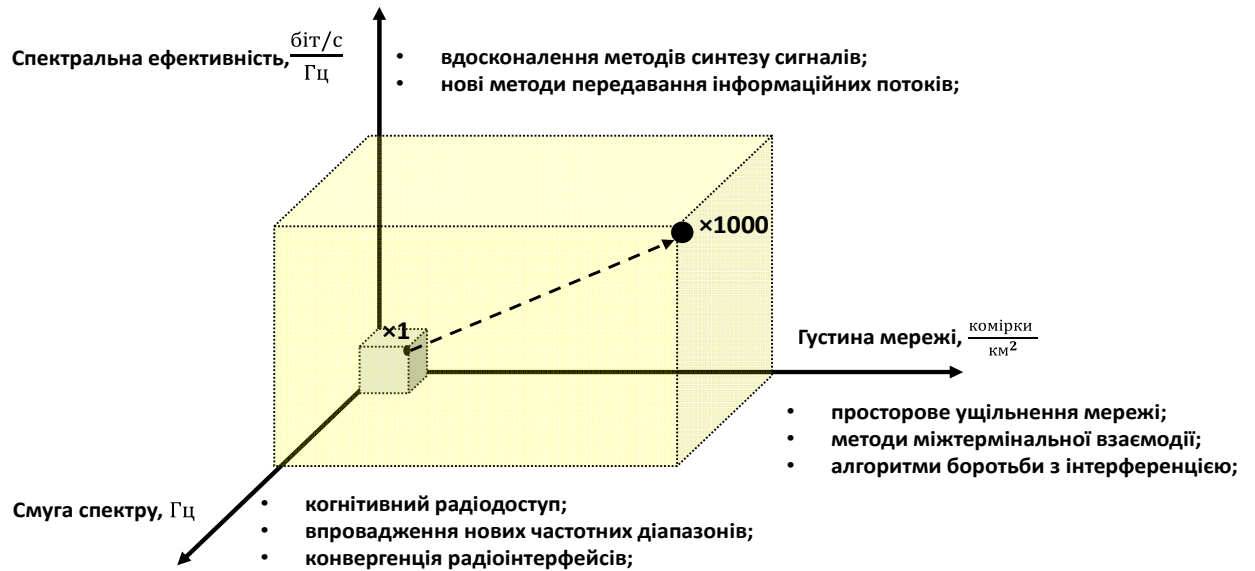


Рис. 1.1. Класифікація потенційних технічних рішень для підвищення пропускної здатності мереж мобільного зв'язку

Переваги концепції гетерогенних мереж мобільного зв'язку очевидні: підвищення коефіцієнту використання спектру, значно вища пропускна здатність радіоканалів, простота впровадження нових базових станцій, легкість масштабування та платформна незалежність [31-37]. Однак, гетерогенні мережі характерні рядом недоліків: висока густина базових станцій спричиняє значно вищий рівень інтерференції у мережі, складність багаторівневих гетерогенних мереж не дає змогу ефективно планувати інфраструктуру базових станцій та їх опорної транспортної системи [38-45]. Планування та балансування навантаження у гетерогенних мережах із багаторівневою архітектурою є доволі складним завданням, оскільки практично у будь-якій точці мережі абонент може вибирати з десятків можливих варіантів підключення, що потребує єдиної централізованої площини керування та прийняття рішення стосовно розподілу частотних ресурсів [46-53].

На засіданні Кабінету Міністрів України від 4 липня 2017 року було схвалено зміни до діючих постанов № 993 від 01.08.2007 та №200 від 22.02.2006, з метою забезпечення механізму впровадження мереж мобільного зв'язку 4G в Україні. Проект даного документу було розроблено Національною комісією, що здійснює державне регулювання у сфері зв'язку та інформатизації (НКРЗІ).

Запропоновані зміни спрямовано на вирішення поточних проблем впровадження в Україні мереж стандарту 4G. Зокрема, це стосується впорядкування радіочастотного ресурсу та надання ліцензій операторам на технологію LTE на конкурентній основі. Наразі в Україні немає вільного радіочастотного спектру для впровадження мереж мобільного зв'язку 4G. Для повноцінного використання переваг технології LTE операторам необхідно забезпечити широкі суцільні смуги частот [54-56]. Тому, основною перешкодою для впровадження мереж LTE в Україні є неефективно фрагментовані смуги радіочастот, що призвело до проблем вже при впровадженні 3G. Незважаючи на теоретичну пропускну здатність понад 63 Мбіт/с, на практиці оператори не в змозі забезпечити більше 20 Мбіт/с. Це зумовлено неможливістю виділити широкі смуги частот в межах однієї комірки у зв'язку із особливістю частотного планування для уникнення інтерференційних завад між комірками.

Тому, для звільнення частотних діапазонів необхідних для проведення тендеру, потрібно використати механізми вирівнювання смуг та мотиваційні заходи щодо проведення конвертації частот. Із усіх придатних для впровадження 4G частотних діапазонів найбільш перспективними є діапазони 1800 МГц та 2600 МГц. Наразі, є можливість звільнення частини спектру і діапазоні 2600 МГц для впровадження мереж LTE. Стосовно використання діапазону 1800 МГц, необхідно врахувати, що в даному діапазоні працюють три найбільші оператори мобільного зв'язку, абонентами яких є майже все населення України. Тому, важливо гарантувати, щоб поточне обслуговування абонентів за технологією 2G забезпечувалось на належному рівні [56-63]. Тому,

пріоритетне право викупу даного частотного діапазону під 4G, згідно поточного плану, будуть мати оператори, які використовують дані радіочастотні ресурси для обслуговування абонентів 2G.

Окрім того, НКРЗІ спільно з Держспецзв'язком Міноборони створили робочу групу з питань технологічної нейтральності та створення умов для видачі ліцензій на користування радіочастотним ресурсом для впровадження технологій мобільного зв'язку четвертого та п'ятого поколінь.

Координована робота над зазначеними аспектами регулювання радіочастотного ресурсу окреслює можливі шляхи досягнення компромісу усіма зацікавленими сторонами. Це дасть змогу виконати послідовність дій, які необхідні для видачі ліцензій на використання радіочастотних ресурсів операторами зв'язку та створення рівноцінних умов для всіх учасників ринку мобільного зв'язку в Україні.

Для зниження завантаженості ліцензійних частотних діапазонів перспективним рішенням для LTE є використання альтернативних частотних діапазонів, які не потребують ліцензування. Для цього найоптимальнішим рішенням в Україні є неліцензійний діапазон 5170-5850 МГц. Даний радіочастотний діапазон характерний достатньою дальністю поширення сигналу для забезпечення мінімальних вимог до покриття малих комірок при потужності передавання до 100 мВт, яка встановлена регулятивними органами. Це практично підтверджуються ефективним функціонуванням локальних безпроводних мереж Wi-Fi у тому ж частотному діапазоні [64-65].

Аналіз напрацювань вітчизняних та зарубіжних учених підтверджує актуальність тематики роботи та вказує, що проблема розгортання гетерогенних мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу є актуальною в Україні та за її межами, і може бути вирішена із застосуванням наукових засад розгортання мереж LTE в неліцензійному діапазоні, вдосконалених методів управління радіочастотними ресурсами в ліцензійному та неліцензійному діапазонах та

алгоритмів координації інтерференційних завад між LTE операторами та локальними мережами Wi-Fi [66-72].

Таким чином, основна ідея роботи полягає у системному підході до впровадження мереж мобільного зв'язку LTE в умовах недостачі ліцензійних частотних ресурсів шляхом гнучкого використання неліцензійного спектру, адаптивного розподілу навантаження між вузлами безпроводної мережної інфраструктури, а також нових методів агрегації частотних каналів в ліцензійному та неліцензійному діапазонах. Вирішення поставлених завдань дасть змогу створити фундаментальні засади для подальшої еволюції мереж мобільного зв'язку до технологій 5G та парадигми Інтернету речей, що, в свою чергу, призведе до позитивних соціально-економічних перетворень в Україні [73-78].

## **1.2. Сучасний стан розподілу спектру для гетерогенних мереж мобільного зв'язку**

Різні світові адміністрації по дослідженню спектрів вже приступили до дослідження і розгляду потенційно нових смух для 5G. Це дослідження так само потребує зусиль даної галузі спрямованих на характеристику нових діапазонів частот для 5G і розробки технічних рішень, спрямованих на наступне покоління мобільних ширококомовних стільникових систем. З огляду на потребу у більшій пропускній здатності [79-93]. Дані дослідження були спрямовані на вивчення можливостей діапазону частот від 6ГГц до 100ГГц. Дослідження різних адміністративних органів що досліджують нові смуги частот для 5G у всьому світі знаходяться на різних стадіях. Деякі з них, включаючи FCC , регулюють свої дослідження шляхом публічних обговорень громадськості і вирішення цього питання через внутрішні процеси. Інші в тому числі і Великобританський Ofcom вирішили доповнити дослідження публічними обговореннями і прийняти деякі з пропозицій в процесі підготовки

до WRC-15 в своєму регіоні, щоб отримати консенсус на розгляд 5G спектру в рамках безлічі пунктів порядку денного WRC-19.

Таблиця 1.1

Стан громадських пропозицій для груп 5G спектру.

Країна	Статус Частот/Діапазонів	Нотатки
Китай	Підтримка WRC-19 пункту порядку денного - ніяких конкретних пропозицій публічно представлених на даному етапі	Поточні діапазони: 25-30, 40-50, 71-76, 81-86 ГГц.
Фінляндія	Підтримка WRC-19 пункт порядку денного пошук ІТМ спектра між 6 ГГц і 100 ГГц. Запропоновано: 8.5-10.6, 13.4-15.2, 15,7-17,3, 19.7-21.2, 24-27.5, 30-31.3, 33,4-36, 37-52.6, 59.3-76, 81-86, 92-100 ГГц.	CPG вересень 2015 року
Японія	Ніякі конкретні діапазони публічно не згадуються. Нові дослідження з метою ідентифікації смуг частот для ІМТ більш високих частотних діапазонів для WRC-19.	Початкові діапазони (2014 року): 14, 28, 40, 48, 70, 80 ГГц
Корея	Запропоновано: 27.5-29.6, 31,8-33,4, 37-42.5, 45.5-50.2, 50.4-52.6, 66-74 ГГц.	Пропозиція, представлена на APG липень 2015 року
Швеція	Підтримує новий пункт порядку денного в діапазоні 5925 МГц до 100 ГГц з числа рухомих і нерухомих смуг. Запропоновано: 5.925-7.025, 7.235-7.25, 7.750-8.025, 10-10,45, 10.5-10.68, 12,75-13,25, 14.3-15.35, 17,7-19,7, 21.4-23.6, 24.25-29.5, 31-31,3, 32.3-33.4, 38-47, 47,2-50,2, 50.4-52.6, 55.78-76, 81-86 ГГц.	Пропозиція, представлена на СРГ. СРГ вересень 2015 року завершать регіональні обговорення.
Велико-британія	Підтримує пункт порядку денного «ІМТ вище 6 ГГц» Дослідження сфокусовано на	Пропозиція СРГ. СРГ вересня 2015 року завершать регіональні



	ряді певних смуг: 10.125-10.225 ГГц / 10.475-10.575 ГГц; 31,8-33,4 ГГц; 40.5-43.5 ГГц; 45.5-48.9 ГГц; і 66-71 ГГц.	обговорення.
Сполучені Штати	Сполучені Штати вирішили запропонувати для вивчення та розгляду на WRC-19 наступні діапазони. 27.5-29.5 ГГц, 37-40.5 ГГц, 47,2-50,2 ГГц, 50.4-52.6 ГГц і 59.3-71 ГГц.	FCC NOI на 24.25-24.45 ГГц і 25.05-25.25 ГГц, 27,5-28,35 ГГц, 29.1-29.25 ГГц і 31-31,3 ГГц, 37.0-38.6 ГГц, 38.6-40 ГГц, 42.0-42.5 ГГц, 57-64 ГГц, 64-71 ГГц, 71-76 ГГц і 81-86 ГГц.

Традиційно, спектр який використовується для стільникового зв'язку знаходиться у ліцензованих смугах де регулюючі органи надають ексклюзивні права для юридичної особи на використання спектра пропонуючи різного роду послуги. Правила отримання виняткових прав на використання спектра відрізняються у різних країнах. У деяких країнах, регіонах встановлюють правила отримання виняткових прав на використання спектру за типом сервісу який буде використовувати спектр. Права на використання спектра надаються спільно з технічними правилами обробки перешкод, як і у внутрішніх смугах так і поза діапазонних перешкод. Також трапляється що у деяких країнах виняткові права на використання спектру надаються тільки з обов'язковим використанням конкретної заданої технології або набору технологій які повинні бути використанні, сервісом який хоче отримати права на використання спектру.

Процес отримання виключних прав на використання спектру може включати в себе:

- публічні аукціони на надання прав для використання спектру
- зобов'язання побудувати зазначені види послуг у певний період часу
- резервування наданих прав для державних служб ( громадська безпека, авіація)

У багатьох випадках є кілька аспектів включених регулюючими органами в процес надання прав на використання спектрального діапазону або виключно його частини. Використання виключно ліцензованого спектра буде критичним елементом у системі 5G і її розгортанні, що забезпечить передбачуваний і стабільний спосіб визначення потрібної потужності для розгортуваних мереж.

В той час як ліцензований спектр має виняткові права на використання і тим самим робить управління перешкодами простішим, хоча це може обмежити гнучкість того як використання спектру змінюється в часі. Це створює ситуацію в результаті якої спектр який був виділений і на який було надано виняткові права є не повністю використаний. Використання може бути географічно сконцентрованим або використовуватись в обмежений період часу в той час як в інших географічних районах і періодах часу спектр не використовується взагалі [83-94].

Для забезпечення більшої гнучкості і дозволу для збільшення використання, було введено поняття розподілу і спільного використання спектру. Таким чином більше число користувачів отримують права на використання спектру. Це дозволяє надавати у використання цей спектр користувачам другого ярусу (тобто “новий ліцензіат”) відповідно до певних правил, щоб уникнути або обмежити перешкоди з користувачем більш високого ярусу ( тобто “діючий ліцензіат”). Право на використання спектра буде обмежуватись географічними районами де чинний ліцензіат спектра не використовує його протягом заданого періоду часу.

Для доступу до моделі розподілу спектру було розроблено Авторизований Розподіл Доступу(ASA) і Ліцензійний Розподіл Доступу (LSA) це свого роду нормативно правова база для підтримки технічних аспектів. У центральній базі даних, що володіє інформацією про використання спектру, користувачеві другого рівня автоматично може бути надане право на використання спектра в певній географічній зоні протягом певного і обмеженого періоду часу. Модель розподілу ліцензійного спектру надається системі 5G і розгортається

враховуючи гнучкість спектру, що надає можливість використовувати ті частини спектру що є не повністю використаний іншими службами для забезпечення додаткової потужності.

Неліцензійні і ліцензійні звільнені смуги є спектром що визначений для спільного використання не визначеного числа незалежних користувачів без реєстрації і індивідуальних дозволів. Для неліцензованих смуг регульовано встановлення правил за якими додаткові технологічні пристрої а також пристрої промисловості мають використовувати спектр, що дозволяє їм співіснувати без або з обмеженим втручанням перешкод один одного . Ці правила визначаються відкрито без обмежень для технологічних приладів і інших додатків щоб уникнути шкідливих перешкод і зниження ризику їх виникнення. У неліцензійному спектрі не існує процесу для встановлення права на його використання а отже він може бути використаним будь яким пристроєм який є сумісним з вимогами до використання наприклад має підходящі максимальні рівні потужності, пропускну здатності і обмеження циклів. Використання неліцензійного спектру є важливим доповненням для розгортання всіх систем 5G зокрема при розгортанні не великих систем [95-98].

### **1.3. Аналіз основних невирішених завдань для забезпечення ефективного функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку**

#### **1.3.1. Спільне використання спектру кількома операторами мобільного зв'язку**

Для операторів мобільного зв'язку, спільне використання спектра 5G дозволить операторам використовувати більшу частину спектра, динамічно підтримувати крайні смуги пропускання відповідно до волоконно-подібного досвіду. Крім того, спільне використання спектра 5G може розширити переваги

технології 5G NR і систем для осіб, які не мають доступ до ліцензованого спектру, такі як кабельні оператори, підприємства і IoT.

Розширення цих понять продовжується в 5G NR, додаючи інновації навколо нового спектра обміну даними. Так навіщо ці інновації? Як уже зазначалося, основним недоліком неліцензійного і загального спектра є відсутність гарантії QoS. Такі поняття, як QoS в даний час вважаються надзвичайно важливими і є само собою присутнім у ліцензованому спектрі, але досягнути QoS є набагато складніше при спільному використанні спектра. Таким чином, деякі з інновацій зосереджені на створенні спільного використання спектра працюють у напрямку, щоб наблизитися до прогнозованої продуктивності ліцензованого спектру при збереженні його гнучкості.

Ще однією областю інновацій є підвищення загальної ефективності використання спектра при спільному використанні спектра серед кількох розгортань. Це може бути досягнуто за рахунок динамічного прослуховування, його слід використовувати при нижчих навантаженнях, оскільки зіткнення менш ймовірні, і з графіків нижче видно, що ефективність фіксованого ресурсу зростає при об'єднанні трафіку в тому ж діапазоні. Однак при більш високих навантаженнях, досягнення високої продуктивності з динамічним обміном при розподілі фіксованого ресурсу є більш складним, через більшу кількість зіткнень. Це ще одна область для впровадження та дослідження інновацій. З розумним скоординованим механізмом обміну можна досягти значної продуктивності при динамічному спільному використанні спектра через умови навантаження, як показано ранніх результатах моделювання.

На даний час вже є розроблений прототип обміном спектрами для системи 5G NR. Цей випробувальний стенд використовується для відстеження 5G NR стандартизації в області спільного використання спектра. У наступному році, в тестовому центрі буде розроблятися і вдосконалюватись новий пристрій, вже заплановано нові випробування і дослідження з лідерами галузі. Це

дослідження додає до наших існуючих суб-6 ГГц і міліметрових систем хвилі прототипу 5G NR. Вже представлені додаткові інновації 5G в області спільного використання спектра, і передбачено великий потенціал для 5G, щоб використовувати всі типи спектра в обох ліцензованих і неліцензованих спектрах, а також нові парадигми спільного використання спектра.

У минулому році, репортажі в ЗМІ були зосереджені на здатності LTE-U співіснувати з Wi-Fi при спільному використанні того ж набору неліцензійних частотних діапазонів. Але Mobile World Congress (MWC), найбільша мобільна індустріальна виставка, привела нас на гору новин з абсолютно іншим акцентом. Запуск продукту, зобов'язання операторів і технічні досягнення стали основними заголовками. Суперечка йде на спад, тому що всі зацікавлені сторони активно співпрацюють у вирішенні технічних проблем так, що бездротова промисловість може зосередитися на вдосконаленні інновацій, щоб перенести переваги LTE в неліцензійний спектр для споживачів по всьому світу якомога швидше [99].

Компанія Qualcomm зайняла важливе місце у цих подіях. Поряд з іншими прихильниками LTE в неліцензійному спектрі, Qualcomm також має істотний корисливий інтерес в успішному розвитку Wi-Fi. Саме тому вона співпрацює з усіма зацікавленими сторонами, щоб гарантувати, що LTE-U і Wi-Fi будуть співіснувати успішно. Також активно розробляється співпраця з Wi-Fi Alliance для розробки плану тестування та співіснування LTE і Wi-Fi, та очікується, використовуючи цей план підтвердити, що LTE-U не чинитиме негативний вплив на Wi-Fi мережі. FCC також надав Qualcomm Technologies (QTI) запит про спеціальну тимчасову співпрацю, що дозволяє відчувати що розвиток LTE-U продукту не стоїть на місці [100].

QTI також активно бере участь в дослідженні LAA, як з точки зору зусиль по стандартизації в 3GPP і ETSI, щоб продемонструвати можливе співіснування в лабораторіях при впровадженні випробувань. LAA включає в себе технологію під назвою «Listen Before Talk» (LBT), яка відповідає

глобальним правилам співіснування і передбачається що саме ця технологія буде у рівній мірі застосовуватись до LTE і Wi-Fi при роботі в неліцензійному спектрі. Хоча ще дуже багато всього треба дослідити і розробити але співпраця усіх представників мобільної галузі надає великі надії, що все буде зроблено досконало. Співіснування різних технологій, які працюють в неліцензованих смугах також є критично важливим для технологій 5G [101-105].

### **1.3.2. Використання неліцензійного спектру для мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління**

Хоча ліцензований спектр є основою для операторів мобільного зв'язку в рішенні проблеми 1000x даних, пристосування використання неліцензійного спектра стає все більш важливим, щоб реагувати на зростання трафіку економічним чином.

Кращий спосіб для операторів мобільного зв'язку використовувати неліцензійний спектр є його агрегування його з LTE каналом в ліцензійному спектрі.

Є два основні підходи:

1) LTE – Wi-Fi об'єднання каналів тобто задіювати їхні Wi-Fi мережі використовуючи обидві 2.4 ГГц і 5 ГГц смуги;

2) Або ще більш жорсткіший підхід, LTE, що працюють в неліцензійному спектрі 5 ГГц (LTE неліцензійний), підходить для розгортання малих комірок.

Обидва ці варіанти забезпечують більш високу пропускну здатність і підвищується зручність роботи через єдину уніфіковану мережу (в порівнянні з окремою LTE і Wi-Fi мережами).

Вибір між цими двома варіантами агрегування диктується існуючими активами операторів а також їх планами розгортання, очікується що багато операторів використовуватимуть обидва підходи.

LTE - Wi-Fi об'єднання каналів потребує підтримки обох пристроїв і мережевих сторін. На стороні пристрою агрегація відбувається глибоко на

модемному рівні. На мережевій стороні це може бути або між окремими або між спільно розташованими (але скоординованими) Wi-Fi і LTE Wi-Fi точками доступу access points (APs). LTE - Wi-Fi об'єднання каналів є частиною більшої конвергенції, що вже почала відбуватися і є визначеною для 3GPP Rel 13.

LTE - Wi-Fi об'єднання каналів було продемонстроване на MWC 2015 року і надалі знаходиться у розробках спільно з різними командами та партнерами.

LTE Неліцензійний у вигляді LTE-U чи LAA пропонує як можливість стислу агрегацію. Це може забезпечити двох разову або навіть і більшу місткість і краще покриття ніж Wi-Fi. LTE Неліцензований розроблений для цілковитого співіснування з Wi-Fi з функціями які виходять за рамки мінімальних вимог, включаючи нормативні регулюючі стандарти і тестування на погодженість. LTE Неліцензований надає кілька варіантів розгортання для операторів. У таких країнах, як США, Корея та Індія, LTE-U може бути розгорнуто з використанням існуючого Rel 10/11/12. В Європі і Японії, обидва з яких мають «Listen Before Talk» (LBT) нормативні вимоги, потрібна зміна стандарту котрий в даний час стандартизований як Rel. 13 і називається Licensed Assisted Access (LAA).

Мобільна індустрія показала сильну підтримку LTE-U і LAA з різного роду випробуваннями і анонсами нової продукції. Qualcomm Technologies, Inc. (QTI) є одним із засновників форуму LTE-U, що створений для співпраці між гравцями галузі, сформованих для узгодження специфікацій. QTI оголосила LTE-U пристрій і мало коміркові рішення. На MWC 2015 було продемонстровано ефективність LTE-U і LAA і як вони будуть співіснувати з Wi-Fi [105-113].

LTE - Wi-Fi агрегування каналів і LTE Неліцензовані є рушійними інструментами для операторів мобільного зв'язку в рішенні 1000x завдання (зростання трафіку). Крім операторів мобільного зв'язку, Wi-Fi буде

залишатися основним варіантом для приватного і корпоративного доступу до мережі на довгі роки.

### **1.3.3. Розроблення алгоритмів самоорганізації складної гетерогенної інфраструктури мережі мобільного зв'язку**

Перспективний підхід, якому зараз надають багато уваги у промислових та дослідницьких спільнотах полягає у тому, щоб максимально збільшити загальну продуктивність у стільникових мережах шляхом надання їм інтелекту та автономної адаптивності. Це традиційно називають самоорганізацією. Самоорганізація, яка застосовується до стільникових мереж, називається самоорганізованою мережею (SON) і є ключовим фактором для покращення технічного обслуговування (OAM). SON прагне знизити вартість встановлення та управління шляхом спрощення операційних завдань за допомогою можливості налаштування, оптимізації та відновлення. Основним завданням SON є зменшення витрат, пов'язаних із операціями мережі, тобто капітальних витрат (CAPEX) та операційних витрат (OPEX), зменшуючи залучення людей, одночасно підвищуючи продуктивність мережі, з точки зору пропускної спроможності мережі, покриття та якості послуг. Мотивація щодо введення SON від операторів, органів стандартизації та проектів зростає. З одного боку, з точки зору ринку, постійно зростаючий попит на різноманітність пропонованих послуг та необхідність скоротити час до ринку інноваційних послуг ще більше посилюють тиск на збереження конкурентоспроможності за рахунок зменшення витрат. Загальна ідея SON полягає в тому, щоб інтегрувати мережеве планування, конфігурацію та оптимізацію в єдиний, переважно автоматизований процес, що потребує мінімального втручання людини. З іншого боку, з технічної точки зору складність і масштаб майбутніх технологій радіодоступу створює серйозні операційні проблеми через безліч настроюваних параметрів та складних взаємозв'язків між ними. Очікується, що поява нових гетерогенних вузлів, таких як фемто, піко, реле тощо, призведе до значного



збільшення кількості вузлів у новій екосистемі, так що традиційні заходи з управління мережею класичними ручними налаштуваннями та проектуванням здаються не життєздатними. Так само, процеси оптимізації вручну або діагностика та ліквідація несправностей, виконані експертами, більше не є ефективними і потребують автоматизації, оскільки це зумовлює часо-затратні експерименти обмеженого операційного спектру або повільне та недостатнє ручне вирішення неполадок. Ключові оперативні завдання, такі як планування та оптимізація радіомереж сьогодні значною мірою відокремлені і це спричиняє внутрішні недоліки, такі як абстракцію технологій доступу для цілей мережевого планування або розгляд показників ефективності, що мають обмежений зв'язок із кінцевим сприйняттям користувача [114-127].

SON була представлена 3GPP як ключовий компонент мережі LTE, починаючи з першої версії цієї технології підвищують їх використання у наступних випусках. У проєкті SOCRATES та 3GPP були визначені важливі випадки використання SON, які можна класифікувати за фазами життєвого циклу стільникових систем (планування, розгортання, обслуговування та оптимізація) на: конфігурацію, самовідновлення та самооптимізацію.

Самоконфігурація - це процес залучення нового сервісного елемента з мінімальним втручанням оператора. Це охоплює етап життєвого циклу стільникової системи, пов'язаний з плануванням та розгортанням. Самоконфігуруючі алгоритми слідкують за всіма аспектами конфігурації eNB. Коли eNB включається, він виявляє транспортну лінію та встановлює зв'язок з основними елементами мережі. Після цього eNB готовий встановити посилення OAM, S1 і X2 і, нарешті, встановити себе в робочому режимі. Після настроювання eNB він виконує автотестування, щоб доставити звіт про стан у вузол керування мережею.

1) ANR. Ця функція є однією з перших функцій SON, яка стандартизується в 3GPP. Функція ANR знаходиться в eNB і керує концептуальною таблицею зв'язків сусідів (NRT). Розташована в межах ANR, Функція виявлення сусідів

знаходить нових сусідів і додає їх до NRT. ANR також містить функцію видалення сусідів, яка видаляє застарілі NR. Функція виявлення сусідства та функція вилучення сусідів є конкретною реалізацією. Існуючий зв'язок Cell Cells (NR) від центральної комірки до потрібної комірки означає, що eNB, що керує центральною коміркою, знає ECGI / CGI та PCI потрібної мережі і має запис у NRT для вихідної комірки, яка ідентифікує цільову комірку. Відповідно до стандартів, UE вимірює та повідомляє наступні типи комірок: (1) обслуговуюча комірка; (2) перераховані комірки (тобто комірки, які вказуються в частині Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN)); із списку сусідніх комірок), (3) виявлені комірки (тобто, комірки, які не вказані E-UTRAN, але виявлені UE). Виявлена комірка може бути стільницею LTE на тій же частоті, LTE коміркою з іншою частотою або навіть коміркою, яка належить іншим технологіям радіодоступу (RAT). Для виявлення міжчастотних осередків або комірок між RAT, eNB потрібно інформувати UE щодо прийому та повідомлення про вимірювання також на інших частотах. Пропонується метод генерації сусіднього списку елементів на основі географічних умов, антенних моделей та передачі енергії. Показники використання випадку ANR також були оцінені в Het-Nets, де використовують SINR з сусідніх комірок для створення сусіднього списку. У версії 11, функція ANR була розширена за допомогою аспектів управління E-UTRAN та технології міжрадіодоступу (IRAT) ANR.

2) Автоматичне призначення PCI. PCI є сигналом фізичного рівня, щоб відрізнити сигнали від різних eNB. Він заснований на сигналах синхронізації. Загальна кількість PCI-інтерфейсів - LTE - 504, тому повторне використання неминуче, особливо в умовах густого розгортання. Завдання автоматичного PCI призначене для автоматичного конфлікту та безладу ідентифікації комірок.

Самооптимізація охоплює весь набір механізмів, які оптимізують параметри мережі під час роботи, на основі вимірювань, отриманих від мережі. 3GPP затвердив кілька випадків використання з версії 9. Нижче наведено

короткий огляд основної функції самопідйомності, яка була представлена в різних останніх випусках. Версія 9 представила перші випадки використання самооптимізації.

1) MLB. MLB - це функція SON, відповідальна за перевантаження комірок через передачу навантаження в інші комірку. Основна мета полягає у покращенні якості кінцевого користувача та досягненні більшої продуктивності системи шляхом розподілу користувацького трафіку через системні радіоресурси. Реалізація цієї функції загалом розподіляється та підтримується оцінкою навантаження та процедурою обміну статусом ресурсу. Повідомлення, що містять корисну інформацію для цієї функції SON (запит на статус ресурсу, відповідь, збій та оновлення), передаються через інтерфейс X2. MLB може бути реалізований шляхом налаштування параметра індивідуального налаштування комірок (Cell Individual Offset) (CIO). CIO містить зміщення обслуговуючої та сусідньої комірки, які повинні бути застосовані всім UE в цій камері, щоб задовільнити умови передачі A3.

2) MRO. MRO - це функція SON, призначена для забезпечення належної мобільності, тобто правильної передачі даних в режимі підключення та переадресації комірок у режимі очікування. Серед конкретних цілей цієї функції ми маємо мінімізацію зниження кількості викликів, зменшення збоїв у радіозв'язку (RLF), мінімізацію непотрібних рук, через погані налаштування параметрів передачі, мінімізацію прогалин. Його реалізація зазвичай поширюється. Повідомлення, що містять корисну інформацію, є: запит на передачу S1AP або запит на передачу X2AP, звіт про передачу, індикація / звіт RLF. Версія 11 була присвячена різним покращенням оптимізації естафетної передачі. MRO працює за режимами підключення та режиму роботи в режимі очікування. У режимі з'єднання він налаштовує значущі параметри тригера передачі, наприклад, зміщення події A3 (при зверненні до внутрішнього-RAT, ручних операцій внутрішнього оператора), Time to Trigger (TTT) або Layer 1 та Layer 3 коефіцієнти фільтрації. У режимі очікування він налаштовує значення

зміщення, наприклад, Qoff-set для внутрішньої RAT, футляра внутрішнього носія.

3) Міжкоміркова координаційна інтерференція (ICIC). ICIC - це функція SON, яка спрямована на мінімізацію перешкод між комірками, що використовують один і той самий спектр. Це передбачає координацію фізичних ресурсів між сусідніми комірками для зменшення перешкод від однієї комірки до іншого. ICIC можна виконувати як в лінії висхідної лінії зв'язку, так і вниз для каналів даних Shared Channel Physical Downlink (PDSCH) та Shared Channel Physical Uplink (PUSCH) або Channel Control Physical Channel Control Channel (PDCCH). ICIC може бути статичним, напівстатичним або динамічним. Динамічний ICIC спирається на частоту коригування параметрів, що підтримується сигналізацією між комірками через інтерфейс X2. Для підтримки активної координації між комірками були визначені індикатори високої інтерференції (HII) та індикатори відносності потужності передачі вузького діапазону (RNTP), тоді як для підтримки реактивної координації було введено Індикатор перевантажень (OI).

4) RACH. Оптимізація RACH спрямована на оптимізацію каналів прямого доступу в комірках, що базується на відгуках UE та знаннях про його сусідню конфігурацію RACH eNBs. Оптимізація RACH може бути здійснена шляхом регулювання параметра керування живленням або зміни формату преамбули, щоб досягти встановленої цільової затримки доступу.

У версії 10, 3GPP визначив нові випадки використання.

1) Оптимізація охоплення та спроможності (CCO) - це функція SON, яка призначена для розробки самоокупних алгоритмів, що забезпечують оптимальні компроміси між охопленням та ємністю. Можна розглянути різні механізми, які динамічно покращать охоплення та потенціал, такі як ICIC, планування та поєднання таких механізмів. Цілі, які можуть бути оптимізовані, можуть бути залежними від постачальника, і включати охоплення комірки в цілому.

2) ES прагне забезпечити якість досвіду кінцевим споживачам з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Мета полягає в тому, щоб оптимізувати споживання енергії шляхом проектування мережевих елементів (NE) з меншим енергоспоживанням та тимчасовим припиненням невикористаної потужності або вузлів, коли це не потрібно. Зокрема, багато літературних робіт зосереджують увагу на включенні / виключенні eNB або маленьких комірок ефективним способом, щоб забезпечити цільовий рівень якості обслуговування / досвіду, при мінімізації витраченої енергії.

Самовідновлення зосереджується на етапі підтримки стільникової мережі. Бездротові стільникові системи схильні до несправностей і помилок, а найважливішим доменом для управління несправністю є RAN. Кожен eNB несе відповідальність за обслуговування району, з невеликою надлишковістю. Якщо NE не в змозі виконувати свої обов'язки, це призводить до періоду деградації, протягом якої користувачі не отримують належних послуг. Це призводить до серйозних втрат оператора.

#### **1.4. Висновки до розділу**

У розділі визначено ключові фактори, які впливають на ефективність функціонування мереж мобільного зв'язку, такі як: кількість базових станцій, доступні радіочастотні ресурси та спектральна ефективність радіоканалів. Для формування напрямку подальших досліджень, проведено аналіз ступеню впливу кожного з вищезгаданих факторів на загальну ефективність функціонування мережі мобільного зв'язку. Визначено, що підвищення спектральної ефективності радіоканалів дає змогу отримати приріст сумарної пропускної здатності мережі у 5 разів. Збільшення доступної смуги радіочастотних ресурсів дає змогу збільшити сумарну пропускну здатність мережі мобільного зв'язку до 25 разів. Основний потенціал щодо нарощування пропускної здатності мереж мобільного зв'язку полягає у зростанні щільності встановлення базових станцій на основі гетерогенної архітектури.

Встановлення великої кількості малих комірок в межах покриття макрокомірки дає змогу підвищити пропускну здатність мережі у понад 1000 разів. Такий значний приріст пояснюється великим коефіцієнтом повторного використання радіочастот на одиницю площі, що дає змогу збільшувати кількість обслуговуваних абонентів без збільшення сумарної смуги радіочастот.

Для збільшення сумарної смуги радіочастот у роботі пропонується використання альтернативних частотних діапазонів, які не потребують ліцензування. Для цього проведено аналіз існуючих літературних джерел та визначено, що найоптимальнішим для мереж LTE в Україні є неліцензійний діапазон 5170-5850 МГц. Даний радіочастотний діапазон характерний достатньою дальністю поширення сигналу для забезпечення мінімальних вимог до покриття малих комірок. Дані результати практично підтверджуються ефективним функціонуванням локальних безпроводних мереж Wi-Fi у тому ж частотному діапазоні.

Підсумовуючи результати проведеного літературного аналізу, окреслено напрямки подальшого вдосконалення мереж LTE, шляхом розроблення нових методів адаптивного використання радіочастотних ресурсів операторами мобільного зв'язку та алгоритмів координації інтерференційних завад між комірками в неліцензійному частотному діапазоні..

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ АДАПТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ РАДІОЧАСТОТНИХ РЕСУРСІВ В ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

### 2.1. Архітектура гетерогенної мережі мобільного зв'язку з кількома рівнями покриття

Централізація мережі радіодоступу є ключовою для майбутніх мобільних мереж, щоб задовольнити величезний попит на мобільний трафік, а також зменшити обсяги капітальних та операційних витрат, з якими стикаються оператори. Як показано на рис. 2.1, нова централізована архітектура стільникових мереж на основі хмарних обчислень, яка підтримує поточні та майбутні стандарти бездротового зв'язку [2]. Це відбувається шляхом відокремлення модуля формування сигналів (BaseBand Unit, BBU) від пристроїв радіодоступу та міграції BBUs у хмару, утворюючи пул BBU для централізованої обробки. Це забезпечує більшу гнучкість та масштабованість з точки зору розміщення додаткових віддалених радіоприймачів (Remote Radio Head, RRH) у порівнянні з традиційними мережами радіодоступу.

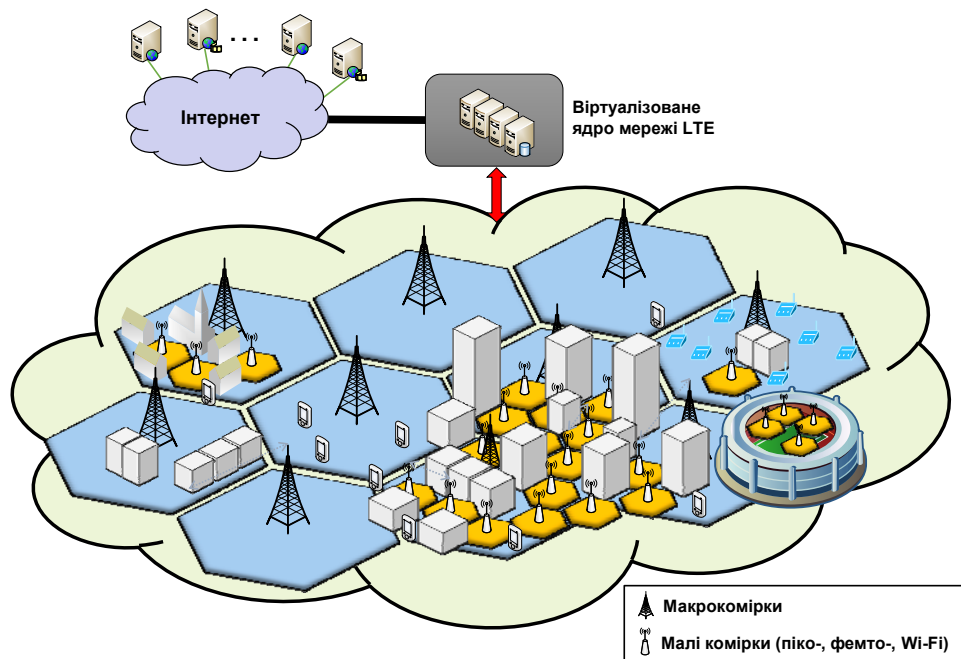


Рис. 2.1. Архітектура гетерогенної мобільної мережі 5G.

Як важливий сценарій системи 5G, розгортання надщільної мережі (Ultra-Dense Networks, UDN) на основі C-RAN відіграватиме дуже важливу роль. Зокрема, розробка UDN передбачає спільне обговорення різних питань, серед яких управління/координація інтерференцією, управління мобільністю, відключення контрольних та користувачьких планів, зворотній зв'язок, а також інтеграція/взаємодія технологій багатоканального доступу (multi-Radio Access Technology, RAT). У цьому випадку C-RAN буде відігравати важливу роль у внутрішніх високошвидкісних схемах координації низької латентності та центральній обробці, необхідній для їх реалізації.

Початковий трафік для UDN повинен мати значну роль у зведенні та відправленні трафіку даних між ланкою радіопередачі та сегментом магістральної мережі. В даний час технології мережі зворотного зв'язку переважно включають мікрохвилі, мідні та волоконні канали передачі тощо. Оператори зазвичай вибирають технологію зворотного зв'язку відповідно до їх потреб у сенсі системної пропускної здатності, надійності, вартості та періоду розгортання.

Провідний зворотний зв'язок - це технологія, заснована на x-цифрових абонентських лініях (x-Digital Subscriber Line, xDSL) або оптичному волокні. Згідно зі статистикою, приблизно 20% всіх поточних розгортань - це xDSL на основі міді та 30% - це волоконно-оптичні. Деякі види оптоволоконного зв'язку можуть пропонувати практично необмежену пропускну здатність на великих відстанях, як показано в таблиці 2.1, що можна назвати «ідеальним» зворотним зв'язком. Рівень пропускної здатності до 100 Мбіт/с може бути гарантований лише до 500 мс зі зворотним зв'язком на основі міді, який, швидше за все, буде витіснений з цієї причини, а також через нездатність масштабувати з економічно ефективним способом з великою кількістю базових станцій.

Бездротовий зворотний зв'язок – це технологія, що базується на мікрохвильовій, Wi-Fi та потенційно іншій технологіях повітряного інтерфейсу. Сьогодні мікрохвилі становлять близько 50% усіх поточних зворотних зв'язків.



Такий зворотній зв'язок широко використовується в Європі і, очікується, що така ж частка збережеться і в наступні роки. Бездротовий зворотний зв'язок буде корисним для мобільних мереж, особливо для UDN, через його помірні витрати на встановлення та відносно короткий час розгортання.

Таблиця 2.1

Пропускна здатність мереж мобільного зв'язку

	Технологія зворотного зв'язку	Затримка (у один кінець)	Пропускна здатність
Ідеальний зворотній зв'язок	Оптичне волокно	<2.5 мс	> 10 Гбіт/с
Неідеальний зворотній зв'язок	Оптичне волокно	10-30 мс	10 Мбіт/с – 10 Гбіт/с
	Оптичне волокно	5-10 мс	100 – 1 000 Мбіт/с
	Оптичне волокно	2-5 мс	50 Мбіт/с – 10 Гбіт/с
	xDSL	15-60 мс	10 – 100 Мбіт/с
	Кабель	25-35 мс	10 – 100 Мбіт/с
	Бездротовий зворотній зв'язок	5-35 мс	10 – 100 Мбіт/с, до Гбіт/с

Крім того, хоча схема зворотного тракту на основі волоконно-оптичного кабелю є кращою за пропускну спроможністю та затримкою, коли розглядаються проблеми зворотного зв'язку для UDN, бездротовий зворотний зв'язок має значні переваги перед дротовим з точки зору розгортання. Також добре підключати та запускати базові станції. Тому гібридна архітектура зворотного трафіку, яка включає дротові та безпроводові параметри, повинна бути інтелектуальною для UDN.

Бездротова сіткова мережа, яка є гібридною архітектурою зворотного трафіка, спрямована на побудову високошвидкісної, високоефективної та самодостатньої бездротової мережі передачі між базовими станціями для того, щоб відповідати вимогам щодо високих швидкостей передачі даних та трафіку. Бездротова мережа також є ключовою мережевою технологією для сценаріїв

UDN у мережі 5G. На рис. 2.2 показана безпроводна коміркова мережа 5G. З точки зору зворотного зв'язку, основна мережа складається з провідного та безпроводного зворотних зв'язків. Базові станції, які працюють як шлюзи, пов'язані з основною мережею дротовим зворотним зв'язком; водночас безпроводні базові станції зворотного зв'язку пов'язані між собою безпроводним зворотним зв'язком, який утворює сіткоподібну безпроводну мережу. Базова станція безпроводного зворотного зв'язку може передавати дані інших базових станцій під час передачі своїх даних. Базові станції безпроводного зворотного зв'язку можуть швидко обмінюватися інформацією обслуговуваних користувачів, ресурсами передачі тощо через безпроводні канали та приймати координаційні рішення для забезпечення високої продуктивності та послідовної служби для користувачів [1].

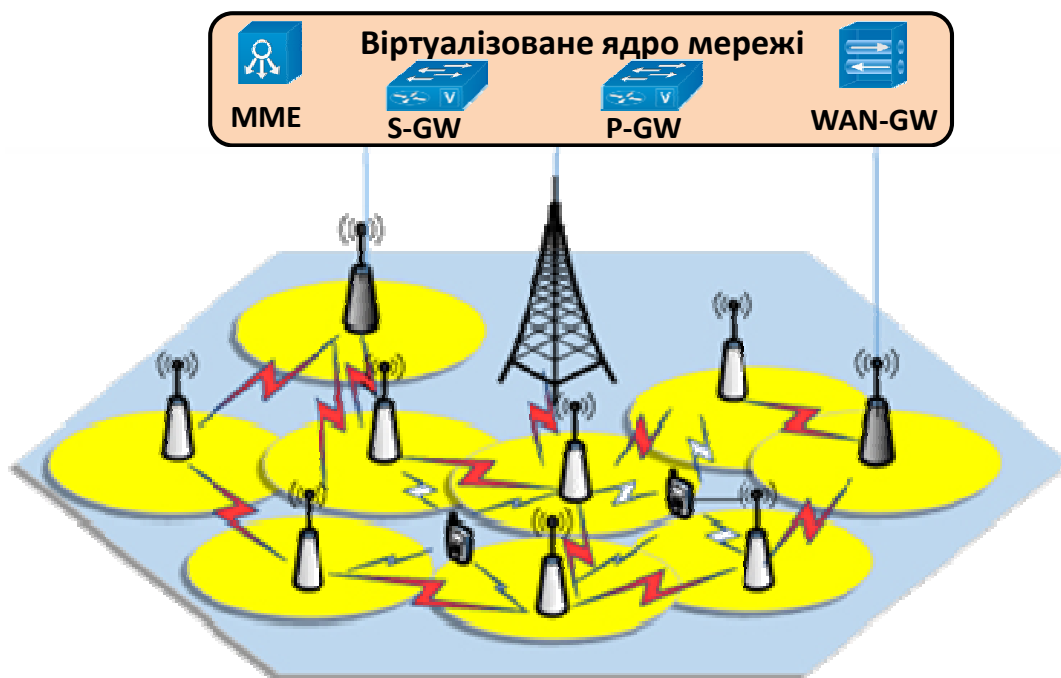


Рис. 2.2. Комірка безпроводної мережі.

Для кращого розгортання мережа бездротової сітки може бути побудована з ієрархічною зворотною трасою, де різні базові станції позначаються шарами. Перший шар зворотного зв'язку включає макроелементи та інші дрібні клітини, які мають провідний зворотний тракт. Малі клітини, що належать до другого каналу зворотного зв'язку, з'єднані з базовими станціями в першому каналі

зворотного зв'язку з бездротовою передачею з одним хопом. Аналогічно, маленькі клітини, що належать до третього і наступних шарів, з'єднані з верхнім шаром за допомогою одномоментної бездротової передачі. Ця архітектура поєднує в собі дротовий та бездротовий зворотний зв'язок разом з фіксованою або адаптивною структурою, яка може забезпечити легкий і мережевий режим з підключенням і відтворенням.

З точки зору структури трансмісії зворотного потоку, бездротовий зворотний зв'язок включає підходи типу точка-точка (Point-To-Point, PTP) та точка-багатоточка (Point-To-MultiPoint, PTMP). Архітектура включає в себе безпроводну схему PTP з адаптивною архітектурою зворотної траєкторії, яка може адаптуватися до балансу навантаження серед усіх маленьких комірок. В цій архітектурі розглядаються три топології:

- 1) топологія дерева з єдиним вузлом шлюзу, який з'єднує мережу зворотного зв'язку з магістральною волоконною мережею;
- 2) декілька паралельних вузлових шлюзів;
- 3) узгоджена топологія сітки з надлишковими посиленнями.

У цьому типі архітектури різні частоти можуть бути призначені для різних частин зворотної мережі, щоб задовольнити мінливі умови руху та придушувати перешкоди. Ця адаптована PTP архітектура дуплексного розподілу частот (Frequency Division Duplex, FDD) для малих мобільних комірок зворотного тракту дозволяє не лише змінювати загальну топологію зворотного зв'язку, але й надає змогу кожній окремій лінії зворотного тракту змінювати свою частоту для задоволення вимог до трафіку та пом'якшення перешкод.

## **2.2. Використання неліцензійного частотного діапазону в гетерогенних мережах мобільного зв'язку**

Хоча ліцензований спектр є основою для операторів мобільного зв'язку в рішенні проблеми 1000x даних, пристосування використання неліцензійного

спектра стає все більш важливим, щоб реагувати на зростання трафіку економічним чином.

Кращий спосіб для операторів мобільного зв'язку використовувати неліцензійний спектр є його агрегування його з LTE каналом в ліцензійному спектрі.

Є два основні підходи використання неліцензійного спектру в гетерогенних мережах мобільного зв'язку:

- Об'єднання каналів LTE та Wi-Fi використовуючи частотні смуги 2.4 ГГц та 5 ГГц.

- Розгортання LTE у неліцензійному частотному діапазоні 5 ГГц (LTE-U).

Обидва ці варіанти забезпечують більш високу пропускну здатність і підвищується зручність роботи через єдину уніфіковану мережу (в порівнянні з окремою LTE і Wi-Fi мережами).

Вибір між цими двома варіантами агрегування диктується існуючими активами операторів а також їх планами розгортання, очікується що багато операторів використовуватимуть обидва підходи.

LTE - Wi-Fi об'єднання каналів потребує підтримки обох пристроїв і мережевих сторін. На стороні пристрою агрегація відбувається глибоко на модемному рівні. На мережевій стороні це може бути або між окремими або між спільно розташованими (але скоординованими) Wi-Fi і LTE Wi-Fi точками доступу access points (APs). LTE - Wi-Fi об'єднання каналів є частиною більшої конвергенції, що вже почала відбуватися і є визначеною для 3GPP Rel 13.

LTE - Wi-Fi об'єднання каналів було продемонстроване на MWC 2015 року і надалі знаходиться у розробках спільно з різними командами та партнерами.

LTE Неліцензійний у вигляді LTE-U чи LAA пропонує як можливість стислу агрегацію. Це може забезпечити двох разову або навіть і більшу місткість і краще покриття ніж Wi-Fi. LTE Неліцензований розроблений для

цілковитого співіснування з Wi-Fi з функціями які виходять за рамки мінімальних вимог, включаючи нормативні регулюючі стандарти і тестування на погодженість. LTE Неліцензований надає кілька варіантів розгортання для операторів. У таких країнах, як США, Корея та Індія, LTE-U може бути розгорнуто з використанням існуючого Rel 10/11/12. В Європі і Японії, обидва з яких мають «Listen Before Talk» (LBT) нормативні вимоги, потрібна зміна стандарту котрий в даний час стандартизований як Rel. 13 і називається Licensed Assisted Access (LAA).

Мобільна індустрія показала сильну підтримку LTE-U і LAA з різного роду випробуваннями і анонсами нової продукції. Qualcomm Technologies, Inc. (QTI) є одним із засновників форуму LTE-U, що створений для співпраці між гравцями галузі, сформованих для узгодження специфікацій. QTI оголосила LTE-U пристрій і мало коміркві рішення. На MWC 2015 було продемонстровано ефективність LTE-U і LAA і як вони будуть співіснувати з Wi-Fi.

LTE-Wi-Fi агрегування каналів і LTE-U є рушійними інструментами для операторів мобільного зв'язку в рішенні 1000х завдання (зростання трафіку). Крім операторів мобільного зв'язку, Wi-Fi буде залишатися основним варіантом для приватного і корпоративного доступу до мережі на довгі роки.

Для операторів, спрямованих на вирішення проблеми 1000х, ліцензований спектр є основою. У той самий час, використання доступного неліцензійного спектру з користю, має також надзвичайно важливе значення. Багато операторів вже розгорнули свої власні мережі Wi-Fi або працюють з провайдерами третіх сторін чи роблять і те і інше. Але завдання полягає у створенні безперебійної мережі, а так як Wi-Fi мережі в багатьох випадках не є інтегровані з мережами 3G/4G це наразі проблематично. Тому це робить важким для пристроя пошук і з'єднання до мережі без втручання користувача. Крім того, мобільні оператори не мають ніякого контролю над якістю

обслуговування. Обидва 3GPP і Wi-Fi співтовариства (WFA і ін) працюють в напрямку тіснішої між мережевої взаємодії LTE - Wi-Fi.

Елементи цієї “тісної” між мережевої взаємодії діапазонів, є дозвіл мати безперебійний відкритий Wi-Fi та безперервне обслуговування і об’єднання каналів. Наприклад, Hotspot 2.0, дозволяє операторам розширити аутентифікацію SIM для Wi-Fi, а також розгорнутися в комерційних мережах.

Wi-Fi швидко розвивався протягом останнього десятиліття, і продовжує розвиватися, успішно пропонуючи високу швидкість передачі даних, потужність і призначений для досвідчених користувачів.

Остання версія стандарту 802.11ac по справжньому ламає бар’єр в 1 Гбіт/с. Наступна версія, 802.11ax буде сприяти подальшому підвищенню продуктивності.

Майбутня ініціатива під назвою Оптимізований Досвід З’єднань (на основі 802.11ai, 11k і 11v) спеціально спрямована на рішення проблем щільних розгортань котрі надають значну вигоду Wi-Fi мережам розгорнутих операторами мобільного зв’язку.

Деякі з представлених особливостей є:

- 1) Більш швидкий роумінг між різними точками доступу чи мережами - дозволяє надавати безперебійні послуги в реальному часі;
- 2) Виражене зниження витрат на управління;
- 3) Інтелектуальне балансування навантаження - де користувач є поверненим в напрямку до точки доступу, що може забезпечити краще з’єднання на основі навантаження, а не тільки зосередивши увагу на силі сигналу.

Дивлячись на LTE - Wi-Fi між мережеву взаємодію, що має продуктивність що виходить за межі стандартних методів визначеного мережевого обміну і переходу до LTE - Wi-Fi конвергенції. Як показано на рис. 2.3, конвергенція передбачає надання оптимального вибору лінії зв’язку,

надання безперебійних послуг, зменшення перешкод і об'єднання каналів між LTE (і 3G) і Wi-Fi зв'язком і за їх межами.

Конвергенція вимагає багато покращень та доповнень до стандартних визначених функцій, наприклад підключення Connectivity Engine (CnE) для QTI в доповненні до підтримки Hotspot 2.0 і механізмів виявлення, визначеному в 3GPP, що включає в себе власні алгоритми, щоб зробити вибір каналу набагато розумніші. CNE також має всі основні елементи і інтелектуальні алгоритми, необхідні для ефективного забезпечення безперервного і безперебійного обслуговування, і так далі.

### 2.2.1. Агрегація каналів LTE та Wi-Fi підвищення пропускної здатності мережі

При агрегації каналів LTE та Wi-Fi оператор має змогу сумувати пропускну здатність LTE у ліцензійному частотному діапазоні та пропускну здатність Wi-Fi у неліцензійному частотному діапазоні [128]. Таке рішення не потребує об'єднання каналів на рівні ядра мережі. В такому випадку, абонент може отримувати додаткову пропускну здатність навіть при підключенні до приватної точки доступу Wi-Fi, яка не належить оператору (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Агрегація каналів LTE та Wi-Fi без об'єднання на рівні ядра.

Користувачі будуть підключені одночасно до обох ланок, отримуючи більш високу швидкість передачі даних, а також безперебійну мобільність, в порівнянні з окремими (автономними) LTE і Wi-Fi мережами. Як згадувалося раніше, багато операторів вже розгорнули свої власні мережі Wi-Fi і LTE-Wi-Fi агрегація каналів забезпечує відмінне рішення, щоб краще інтегрувати їх з мережею LTE, і поліпшити загальну продуктивність. З точки зору мережі, Wi-Fi точки доступу будуть підключені до мережі LTE, так само як і будь-які невеликі комірочки і в повній мірі використовувати ядро мережі, шифрування, контроль, перевірку справжності LTE, і інших систем. Результатом є те, що базова станція LTE проводить управління та розподіл ресурсів Wi-Fi точки доступу.

Ще більш важливим є те, що LTE і Wi-Fi точки доступу не повинні бути поєднані, і дозволяється використання навіть макрокомірок LTE. Це означає, що коли один з пристроїв, що підтримує дану функцію буде підключатись до мережі, переваги LTE-Wi-Fi агрегації будуть доступні для нього в короткий термін з мінімальними змінами LTE та Wi-Fi.

Це має важливе значення тому, що агрегація на рівні модема забезпечує краще балансування навантаження (в порівнянні з іншими варіантами). LTE мережа завжди повідомлена про стан завантаження і потужності сигналу на обох ланках і може балансувати трафік по посиленнях відповідно [129]. Крім того LTE може швидко адаптуватись до швидких змін в умовах лінії зв'язку, в порівнянні з іншими варіантами такими як об'єднання в HTTP-шарі, в операційній системі високого рівня (HLOS), які повільно адаптуються.

З точки зору користувачів, коли вони у стані підключення до двох мереж їхні дані розумно розподіляються між двома каналами щоб забезпечити найкращу продуктивність. Агрегація Wi-Fi зв'язку є безперебійною без ніяких ручних втручань і є доступною будь де за потребою користувача.



### **2.2.2. Агрегація каналів LTE у ліцензійному та неліцензійному частотному діапазоні**

У бездротовому зв'язку сигналізаційна інформація і інформація управління має дуже важливе значення щоб не тільки зберегти надійність каналу зв'язку але і переконатись що ресурси розподілено правильно. Це стає ще більш важливим в щільному розгортанні, де є багато перешкод і де вузли в мережі конкурують один з одним за ресурси. У таких випадках, управління ресурсами і впевненість, що вони виділяються в упорядкованому образі є основною потребою. Крім того розподіл ресурсів і інша інформація така як інформація сигналізації та управління повинна надійно передаватись між точками доступу і пристроями. Дану задачу найкраще можна виконувати за допомогою надійного зв'язку на ліцензованому спектрі. Це одна з причин, серед багатьох чому отримання найкращої продуктивності неліцензійного спектра вимагає його агрегації з LTE каналами в ліцензованому спектрі.

LTE-Wi-Fi об'єднання каналів створене для залучення носіїв мереж Wi-Fi і використовує обидві 2,4 ГГц і 5 ГГц неліцензованих смуги. У такому варіанті LTE базова станція (ENodeB) контролюватиме обсяг трафіку, запланований через Wi-Fi, і тим самим зможе забезпечити належним чином балансування навантаження між ланками LTE і Wi-Fi. LTE-U/LAA для розгортання нових дрібних комірок і використовує неліцензійний діапазон 5 ГГц.

Для обох LTE-U і LAA, всі сигнали сигналізації і управління передаються через надійні ліцензовані канали (мережі LTE) і неліцензований зв'язок використовуються тільки для передачі даних. Це одна з причин, чому LTE Неліцензований може працювати краще, ніж Wi-Fi поодиноці. Обидва варіанти використовують єдину уніфіковану базову мережу, яка забезпечує економічну ефективність і простоту управління для операторів, пропонуючи при цьому безперервні безперебійні послуги і більш широкосмуговий доступ для користувачів. Вибір між цими двома варіантами агрегування залежить від поточних активів і майбутніх мережевих планів операторів.

Останнє доповнення MuLTEfire працює виключно в неліцензійному спектрі і розширює LTE інфраструктуру для нових можливостей розгортання. MuLTEfire не є сфокусований на цьому але також буде корисним для мобільних операторів для розвантаження трафіку. LTE-U і LAA використовує вже комерційну функцію агрегації несучої для об'єднання LTE на обох ліцензованих і неліцензованих спектрах. LTE Неліцензований ідеально підходить для використання у нових не великих комірках орієнтованих на 5 ГГц у неліцензійному спектрі, який має до 500 МГц пропускної здатності наявної у багатьох регіонах світу. LTE-U і LAA презентує найвищий можливий рівень агрегації між двома типами спектра, як схожі технології схожі базові мережі і навіть схожі малі комірки є використані показано на рис. 2.4.



Рис. 2.4. Агрегація LTE в ліцензійному та неліцензійному спектрі для малих комірок

LTE-U і LAA можуть бути розгорнуті в будь-якій Supplemental Down Link (SDL) конфігурації де неліцензійний спектр використовується тільки для низхідних ліній зв'язку або у конфігурації TDD, в якому неліцензійний спектр використовується як для низхідних так і для висхідних ліній зв'язку. Через свою простоту, початкове розгортання буде використовувати SDL.

LTE-U визначається як SDL і у початкових випусках LAA в версії Release 13 підтримує SDL, з виділенням в версію Release 14, яка, як очікується, має визначити додаткові комбінації агрегацій. Всі рішення для LTE-U

використовують технологію, що була розроблена для мобільності ще у перші дні розробок. LTE підтримує скоординоване та синхронізоване планування ресурсів (замість підходу на основі конкуренції, який використовується в Wi-Fi), і має ефективну лінію радіозв'язку з такими функціями, як масштабування, щоб знизити трафік даних, обробку великих поширень затримки та гібридний ARQ (HARQ), серед багатьох інших [129,130].

При використанні неліцензійного спектра, він динамічно вибирає канал, який не зайнятий Wi-Fi (або іншим користувачем неліцензійного LTE). З підніманням від 500МГц наявного спектра в діапазон 5ГГц, з'явилась хороша ймовірність що канал буде виділено. Якщо вільного каналу не знайдено, пристрій повинен буде ділити канал з Wi-Fi (так названий суміщений канал) і в даному випадку вступає в дію механізм справедливого співіснування. В залежності від регіону механізм справедливого співіснування працює в двох напрямках: У таких країнах, як США, Кореї та Індії, де LTE-U може бути розгорнутий з використанням Rel 10/11/12, співіснування буде досягнуто за допомогою підходу, який ми називаємо CSAT (Carrier Sense Adaptive Transmission). У таких регіонах, як Європа і Японія, співіснування буде ґрунтуватися на Rel-13 LAA, який за своєю суттю підтримує нормативні вимоги LBT заповнювання каналу. Основна ідея спільного каналу співіснування, поділ часу на основі зондування каналу. Часова шкала розподілу може бути трохи більше в CSAT і дуже коротка у LAA. Рис. 2.8. ілюструє роботу з CSAT з прикладом.

Коли LTE-U вимкнений, він сприймає використання каналу шляхом оцінки кількості Wi-Fi точок доступу, і вимикається, щоб дати відповідний час для Wi-Fi. У показаному прикладі LTE-U виявляє канал, і розуміє, що є чотири активних Wi-Fi точок доступу в безпосередній близькості. І звичайно знає, що є два LTE-U точки доступу. Таким чином, він зберігає LTE-U на 2/6 часу, і LTE-U OFF для 4/6 часу, дозволяючи каналу використовувати Wi-Fi точок доступу.

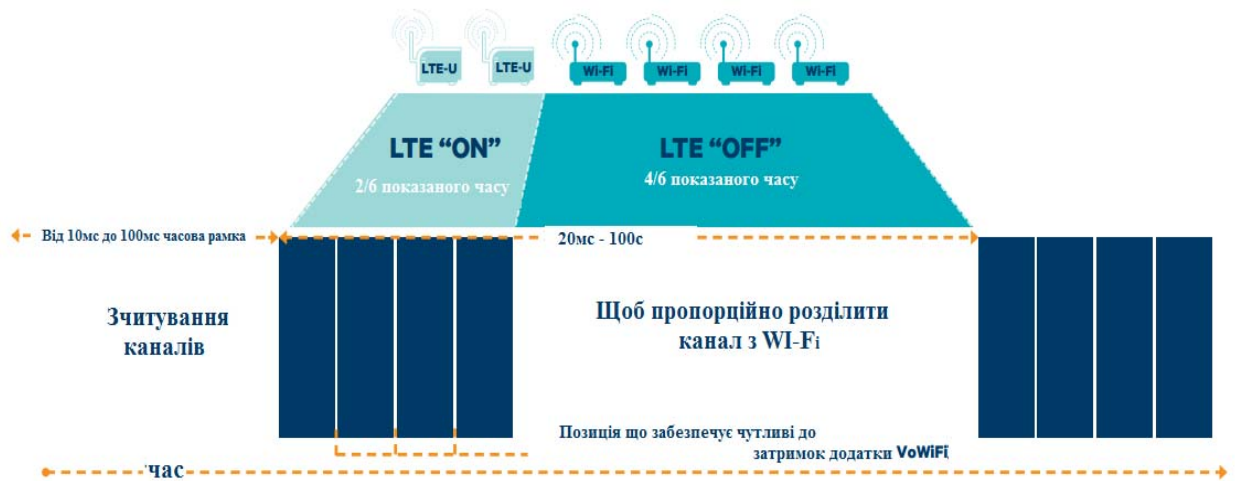


Рис. 2.5. Ілюстрація LTE-U/Wi-Fi справедливої взаємодії на базі CSAT.

Часова шкала для CSAT налаштовується і може тривати як 20 мілісекунд так і 100 мілісекунд. Крім того, LTE-U також вимикається кілька разів протягом дуже короткого часу, в продовж часу який призначений для його включення, щоб дати дозвіл чутливим до затримок додаткам, таких як VoIP, через Wi-Fi отримувати і відправляти свої пакети. LAA сприймає канал кожні 20 мкс, і якщо вільний, займає його протягом наступних 1-10 мілісекунд, час може бути встановлений для динамічного використання аналогічно CSAT, як показано на рис. 2.5.

### 2.3. Модифікований метод випадкового доступу до неліцензійного частотного діапазону

Класичний метод випадкового доступу з прослуховуванням середовища у мережах Wi-Fi функціонує за наступним механізмом. Спочатку передавальна станція прослуховує середовище з метою визначення стану зайнятості каналу. Якщо канал зайнятий, передавальний вузол очікує доки канал буде звільнений, і після випадково обраного інтервалу очікування здійснює свою спробу передавання даних. Якщо дана спроба є успішною, вузол повинен отримати підтвердження від вузла отримувача (ACK). Якщо підтвердження не отримується, то передавальний вузол вважає, що дані були втрачені, і здійснює

повторну спробу передавання даних [130]. Таким чином, мережі Wi-Fi можуть ефективно функціонувати в умовах наявності великої кількості конкуруючих вузлів у спільному частотному діапазоні. Принцип прослуховування середовища мережами Wi-Fi представлено на рис. 2.6.



Рис. 2.6. Часова діаграма процесу прослуховування та адаптивного передавання даних у мережах Wi-Fi

Проте, застосування такого механізму для розгортання мереж LTE є неприйнятним, оскільки пристрої LTE не використовують підтвердження успішного передавання на каналному рівні, що ускладнює процес виявлення колізій. Тому, у роботі запропоновано удосконалений метод випадкового доступу з прослуховуванням середовища для підвищення ефективності функціонування мереж LTE у неліцензійному частотному діапазоні. Особливістю запропонованого методу є те, що він поєднує механізм випадкового доступу до радіоканалу із детермінованим розподілом каналів у мережі LTE. Це реалізується шляхом поділу підкадрів LTE на два типи: підкадр прослуховування та підкадр передавання. Дані підкадри чергуються між собою для забезпечення адаптивного використання радіочастотних ресурсів абонентами LTE, із забезпеченням рівноцінних умов доступу до каналу для абонентів Wi-Fi. Важливою умовою для функціонування запропонованого методу є строга синхронізація основного кадру LTE тривалістю 10 мс та підкадрів LTE тривалістю 1 мс. Кожен пристрій LTE прослуховує середовище протягом першого підкадру, і здійснює передавання протягом усіх наступних підкадрів за умови, що канал є вільним. Якщо канал є зайнятим протягом

першого підкадру, вузол автоматично продовжує прослуховувати канал протягом наступних підкадрів, до тих пір поки канал не звільниться. Якщо, базова станція LTE отримує право доступу до каналу у неліцензійному спектрі, вона займає канал аж до завершення основного кадру, після чого звільняє його для того, щоб надати можливість точкам доступу Wi-Fi рівноцінне право адаптивного використання радіочастотних ресурсів. Запропонований принцип прослуховування середовища мережами LTE представлено на рис. 2.7 [13,19].

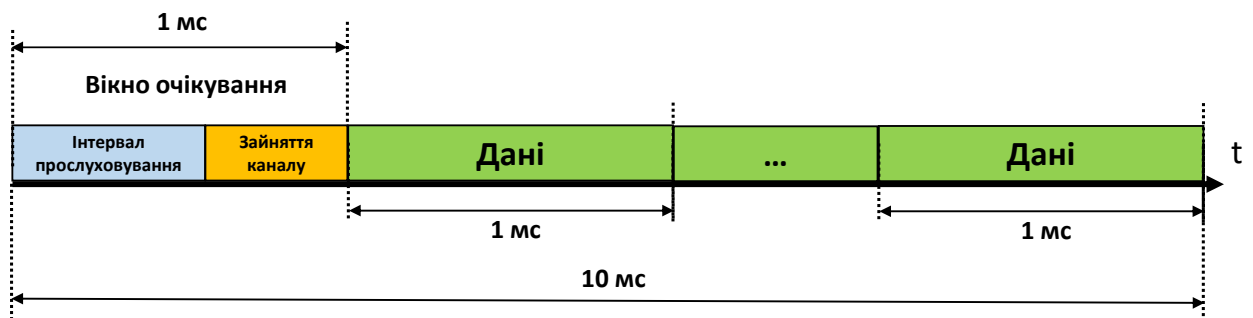


Рис. 2.7. Часова діаграма процесу прослуховування та адаптивного передавання даних у мережах Wi-Fi.

Складність співіснування Wi-Fi і LTE виходить з істотних відмінностей в інтерфейсах і схемах MAC. Wi-Fi працює в 20 МГц каналів і використовує CSMA/CA. Зокрема, кожен передавач сприймає поточну активність по бездротовому каналу до передачі пакета. Якщо канал зайнятий, передавач чекає випадковий час до наступного зондування каналу, щоб дозволити активного користувача закінчити поточну активну передачу по каналу. У CSMA/CA, якщо канал доступний, передавач посилає пакети даних. CSMA/CA дозволяє декільком користувачам доступ до носія з використанням обмеженої кількості каналів спектра. Недолік такого підходу полягає в тому, що збільшення кількості пристроїв знижує продуктивність мережі. Це відбувається тому, що зондування час збільшується, а час передачі даних зменшується.

У порівнянні з Wi-Fi, LTE може передавати дані з використанням різних смуг спектра від 1.4 МГц до 20 МГц. MAC-рівень LTE використовує

множинний доступ з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDMA). У OFDMA, доступна смуга пропускання ділиться на безліч піднесучих, які задовільняють умову ортогональності. Кожна піднесуча має ширину смуги 15 кГц. Піднесучі розташовані в блоках ресурсів. Кожен блок ресурсів складається з 12 піднесучих, в результаті чого у вигляді смуг на 180 кГц, який може бути виділений для передачі даних користувачів. У часовій області, блок ресурсів складається з шести або семи символів, тривалістю 66,7, розділених захисними інтервалами. Таким чином, блок ресурсів передається в інтервалі часу 0,5 мс. Два послідовних часових інтервалів становлять 1 мс підрамник. Кадр LTE складається з 10 підкадрів. Кадру LTE можуть бути розділені на 10 користувачів в тій же смузі частот. Звичайно, збільшення числа користувачів, знижує пропускну здатність для кожного користувача. Проте, в порівнянні з CSMA/CA, OFDMA, допомагає розподіляти ресурси між усіма користувачами відповідно до їх вимог [15,16,17].

Використання неліцензованої смуги для передачі LTE призводить до значного зниження якості користувацького досвіду через проблеми інтерференції. Ми очікуємо, що використання неліцензійної смуги з підходом агрегації несучої, використовуваної в LTE забезпечить більш високу продуктивність, в порівнянні з традиційним використанням неліцензійного спектра [3]. Тому ми розробили підхід, який агрегує пропускну здатність в ліцензовані і неліцензовані смуги одночасно [4]. Дані, що вимагають низької частоти появи помилок, такі як дані сигналізації передачі даних і голосу, як і раніше передаються по ліцензованій смузі спектра, в той час як неліцензована смуга використовується для підвищення пропускну здатності для передачі даних, що дозволяє деяку втрату пакетів. Запропоновано підхід розподілу подвійного підкадру. У запропонованому підході, один підкадр передається по ліцензованій смузі (L-підкадр), а інший кадр передається через неліцензований діапазон (U-підкадр). Ми припускаємо, що мережі Wi-Fi не створюють перешкод LTE-U через зондування каналу перед передачею відповідно до

протоколу CSMA. Наш підхід полягає у використанні переваг протоколу MAC Wi-Fi для LTE каналів в неліцензійній смузі [19]. Протокольна діаграма запропонованого методу випадкового доступу представлена на рис. 2.8, а. Блок-схема методу адаптивного доступу до неліцензійного частотного діапазону представлена на рис. 2.8,б.

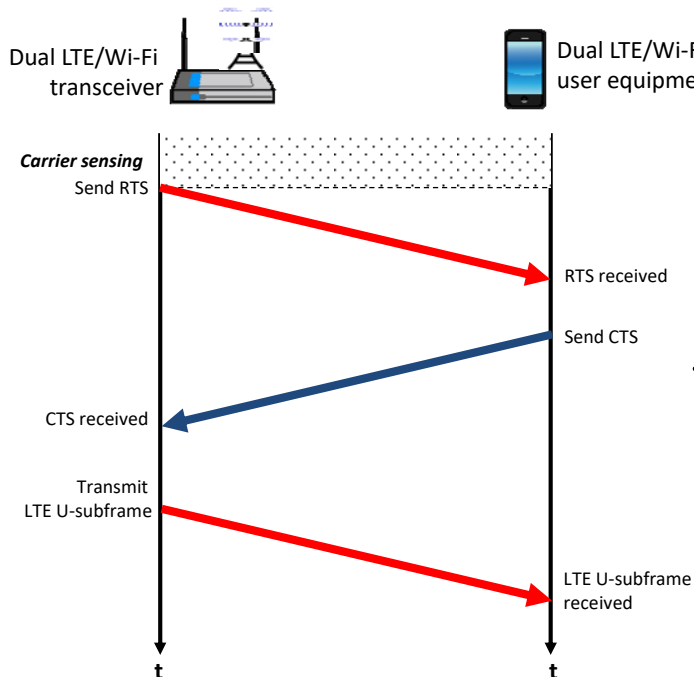


Рис. 2.8. Часова діаграма процесу прослуховування та адаптивного передавання даних у мережах Wi-Fi.

В автономному CASLUA, кожен передавач сприймає канал через Wi-Fi за допомогою передавача CSMA. Ми також доповнюють наш протокол CASLUA з RTS (запит на передачу)/CTS (Clear To Send) механізм встановлення зв'язку для зменшення перешкод, викликаних проблемою прихованого LTE або Wi-Fi вузлів. RTS / CTS рукошукання не є обов'язковим механізмом для протоколу 802.11 і, таким чином, він повністю підтримується існуючими апаратними засобами. На рис. 2.8,а, якщо неліцензійний канал визначається як вільний, передавач посилає RTS на цільовому приймачі. Після прийому CTS, передавальний пристрій виділяє U-підрамки під LTE до цього каналу. В іншому



випадку, пристрій очікує випадкову кількість часу до наступного зондування каналу. Тим часом, U-підрамка тимчасово розподілена ліцензованою смугою до S-CASLUA виявляє вільний неліцензійний канал. Зверніть увагу, що CASLUA не перериває передачу застарілих LTE в ліцензованому спектрі, але використовується для підвищення швидкості передачі даних LTE за рахунок використання як ліцензованого і неліцензованого спектра. Це гарантує надійну роботу як для Wi-Fi і LTE користувачів. У разі, коли є багато користувачів в системі, продуктивність LTE буде надійна завдяки стабільній роботі в ліцензованій смузі і користувачі Wi-Fi не будуть страждати від серйозного втручання з боку користувачів LTE. Іншою важливою перевагою протоколу S-CASLUA є те, що він сумісний з протоколом CSMA і можуть бути реалізовані для обох каналів висхідній і низхідній лінії. Всі функціональні MAC-рівня успадковуються від звичайних Wi-Fi і LTE протоколів. Важливою особливістю є те, що LTE-A і передачі LTE-U виконуються одночасно. У ліцензованого спектру LTE-A працює в звичайному режимі, тоді як в неліцензійного CASLUA спектра використовує Wi-Fi для зондування спектра і випадкового доступу до каналу і LTE-U для передачі даних. Користувачі плануються для передачі даних по неліцензійному спектру, поки CASLUA не може виявити ніякої активності з боку користувачів Wi-Fi в цьому спектрі.

#### **2.4. Модель спільного використання радіочастотних ресурсів при розгортанні мереж LTE кількома операторами у неліцензійному частотному діапазоні**

Враховуючи динаміку зміни інтенсивності навантаження у гетерогенних мережах мобільного зв'язку, постійне зайняття неліцензійного спектру операторами LTE є необґрунтованим. Особливо актуальним, це питання постає при наявності кількох операторів LTE, які прагнуть використовувати ресурси неліцензійного частотного діапазону для обслуговування своїх абонентів. Для

вирішення даної проблеми у роботі запропоновано модель спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону, яка враховує поточні потреби операторів у додаткових радіочастотних ресурсах. Дана модель поєднує елементи теорії ігор та ланцюгів Маркова, з метою відображення як детермінованої, так і стохастичної природи досліджуваної гетерогенної мережі мобільного зв'язку. Модель використовує двовимірний ланцюг Маркова зі станами  $(i,j)$ , в якому перший індекс відповідає за ігрову стратегію оператора зв'язку, яка є детермінованою, а другий індекс відображає поточне використання ресурсів оператора у неліцензійному частотному діапазоні (рис.2.9). Враховуючи непередбачувану поведінку абонента в мережі, дане значення є випадковим.

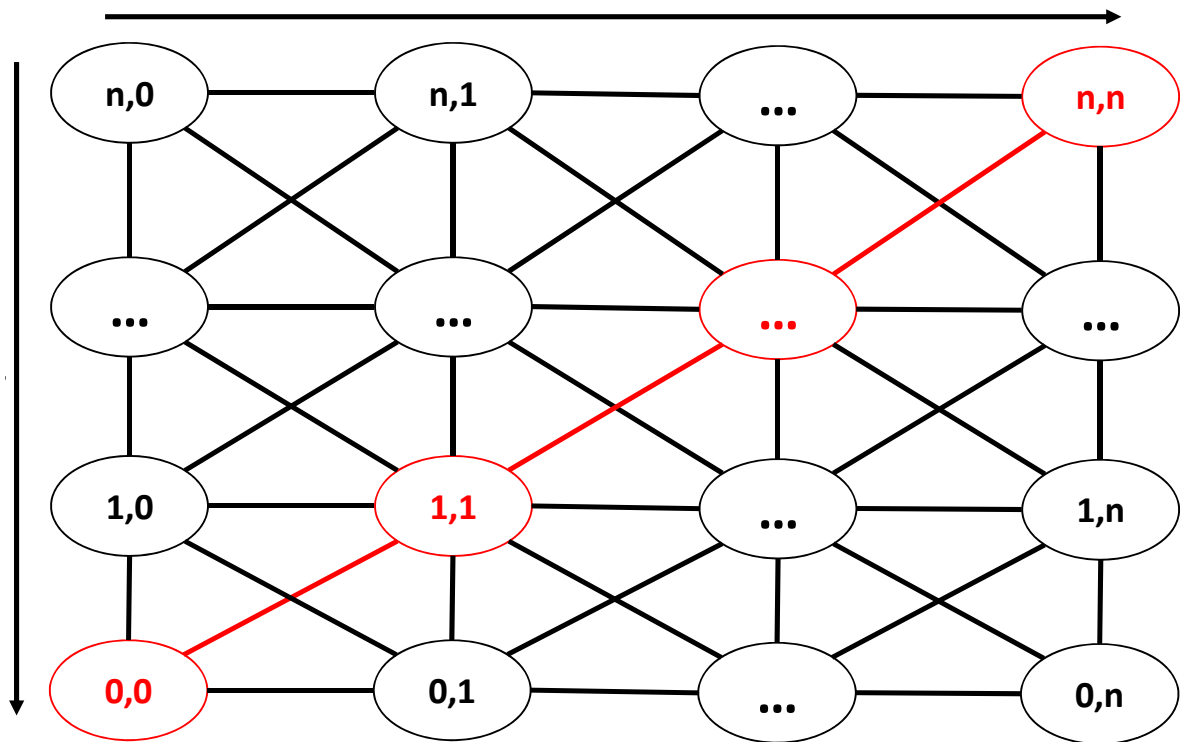


Рис. 2.9. Модель ігрового поля на основі ланцюга Маркова для спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону.

Кожен фіксований стан Марківського ланцюга відображає унікальне значення виграшу оператора, яке визначається на основі співвідношення двох індексів:

- вертикальний індекс визначає значення кількості радіочастотних каналів, які резервуються оператором у неліцензійному діапазоні;
- горизонтальний індекс визначає випадкове значення кількості радіочастотних каналів неліцензійного діапазону, які були використані абонентами мобільного зв'язку протягом останнього кадру.

Відповідно, ігрове поле у запропонованій моделі формується у вигляді квадратної сітки з розмірністю  $[n \times n]$ , де  $n$  – кількість доступних радіочастотних каналів оператора в неліцензійному частотному діапазоні.

Матриця переходів горизонтальних станів у запропонованій моделі визначається як матриця випадкових величин, ймовірність появи яких залежить лише від поточного стану, і не залежить від попередніх станів:

$$T_H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{n1} & h_{n2} & \dots & h_{nn} \end{bmatrix}, \begin{cases} h_{11} \geq h_{12} \geq h_{13} \geq \dots \geq h_{1n} \\ h_{11} \geq h_{21} \geq h_{31} \geq \dots \geq h_{n1}, \\ h_{zk} = h_{kz}, \forall z, k \end{cases} \quad (2.1)$$

де  $h_{zk}$  – ймовірність переходу  $S(i, z) \rightarrow S(i, k)$ . Додаткові умови у виразі (2.1) вказують на те, що ймовірність переходу до сусіднього стану завжди є вищою від ймовірності переходів до наступних станів ланцюга Маркова, незалежно від напрямку переходу. Матриця переходів вертикальних станів записується у вигляді:

$$T_V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & v_{nn} \end{bmatrix}, v_{zk} = P(S_t(i, k) | S_{t-1}(i, z)), \forall i, \quad (2.2)$$

де  $v_{zk}$  – ймовірність переходу стратегії оператора у неліцензійному частотному діапазоні  $S(z, j) \rightarrow S(k, j)$ .

Для моделювання процесу спільного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів між кількома операторами LTE, запропоновано кооперативну ігрову модель з повною інформацією та адаптацією виграшів [14,19]. Вхідними даними для моделі є сумарний обсяг неліцензійних радіочастотних ресурсів для усіх операторів  $W$  та значення вектора Шеплі  $\psi_k$ . Значення вектора Шеплі показують частку кожного оператора у загальному виграші усіх операторів [131]. На основі даної величини визначається частка неліцензійного радіочастотного ресурсу, яка була використана оператором для обслуговування абонентів:

$$\psi_k(M,U) = \frac{1}{M!} \sum_{S \subseteq M \sim \{k\}} S! [U(S \cup \{k\}) - U(S)], \quad (2.3)$$

де  $M$  – кількість мобільних операторів,  $U$  – сумарний усереднений виграш усіх операторів.

Початково, значення Шеплі встановлюються однаковими для усіх операторів:

$$\psi_k = \frac{1}{M}, \quad \forall k. \quad (2.4)$$

Відповідно, ширина смуги радіочастот для кожного оператора розраховується у відповідності до наступного виразу:

$$\omega_k = W\psi_k, \quad \forall k \quad (2.5)$$

Індивідуальний виграш кожного оператора розраховується наступним чином:

$$U_k = \frac{1}{C_k} \sum_i R_i u_i, \quad i \in \{1, n_k\}, \quad k \in \{1, 2, 3\}, \quad u_i \in \{0, 1\} \quad (2.6)$$

де  $C_k$  – максимальна можлива пропускна здатність для заданої частотної смуги  $\omega_k$ ,  $R_i$  – реальна пропускна здатність  $i$ -го користувача,  $n_k$  – кількість користувачів оператора  $k$ .

Після цього індивідуальні виграші усіх операторів усереднюються для розрахунку нових значень Шеплі на основі виразу (2.3). Після цього, весь цикл повторюється знову.

Модель розподілу ресурсів неліцензійного частотного діапазону між операторами представлена на рис. 2.10., для випадку трьох операторів.

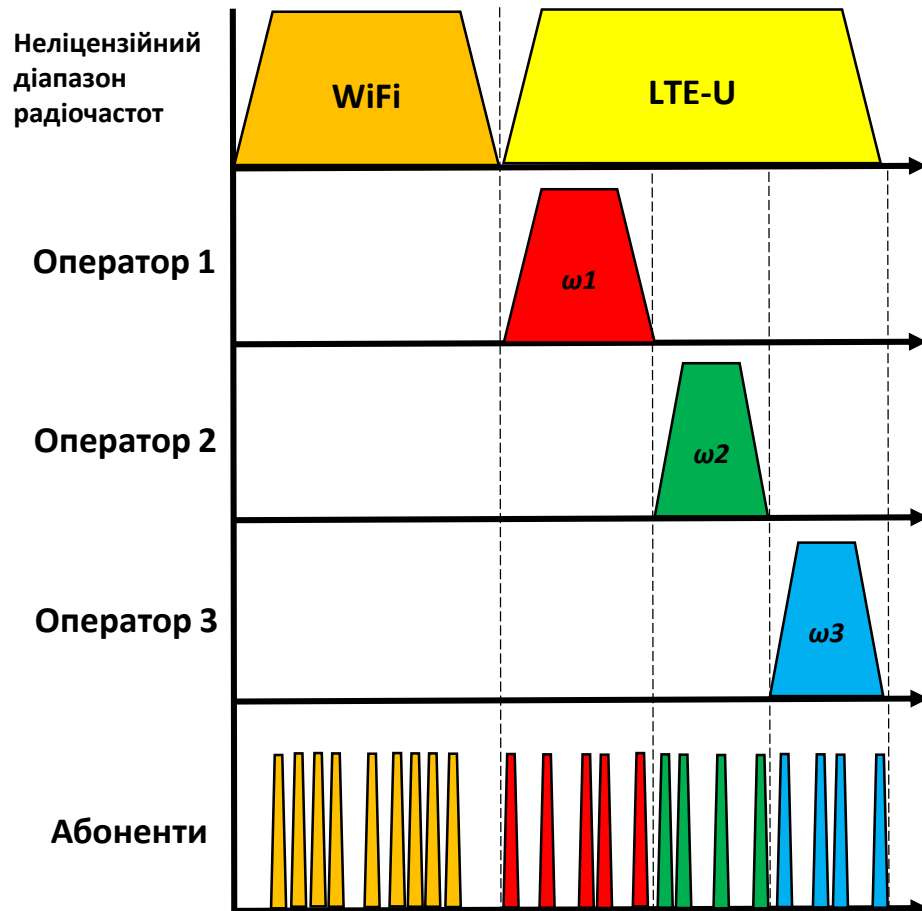


Рис. 2.10. Модель розподілу радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону між операторами LTE

## 2.5. Метод агрегації радіочастотних ресурсів ліцензійного та неліцензійного діапазонів

На основі запропонованої моделі розроблено алгоритм адаптивної агрегації радіочастот ліцензійного та неліцензійного діапазонів. Даний алгоритм використовує логічне розділення радіочастотного ресурсу на три пріоритети доступу оператора [8,9,14]. Найвищий пріоритет доступу оператор

має у власному ліцензійному діапазоні. Наступним за пріоритетом є радіочастотний ресурс, який зарезервований для оператора у неліцензійному діапазоні. Для передавання у даному частотному діапазоні оператор LTE повинен враховувати наявність сусідніх мереж Wi-Fi, щоб забезпечити справедливість використання радіочастотних ресурсів. Найнижчим за пріоритетом доступу для оператора LTE є радіочастотний ресурс неліцензійного діапазону, який зарезервований для інших LTE операторів. Для того, щоб здійснювати передавання даних у такому діапазоні, LTE оператор повинен враховувати наявність не лише сусідніх мереж Wi-Fi, але і комірок LTE оператора з вищим пріоритетом доступу. Модель розподілу радіочастотних ресурсів за пріоритетами доступу представлена на рис. 2.11.

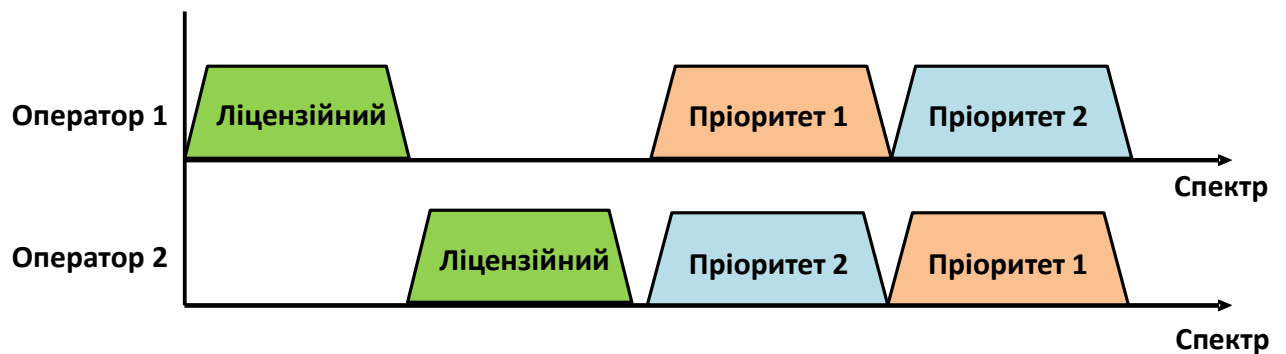


Рис. 2.11. Модель розподілу радіочастотних ресурсів за пріоритетами доступу

На рис. 2.11. представлено варіант спільного використання неліцензійного спектра за допомогою декількох операторів мобільного зв'язку, заснований на прямому поділі спектра на окремі смуги і привласненні кожному оператору ексклюзивної псевдо-ліцензії на частину неліцензійного спектра. Кожен оператор є основним користувачем групи неліцензійного спектра, але шляхом найкращого підбору може отримати доступ до смуг інших операторів в якості вторинного користувача. Принцип агрегації пропускної здатності для запропонованого алгоритму представлений на рис. 2.12. Оператор мобільного зв'язку може збільшити пропускну здатність шляхом об'єднання кількох смуг.

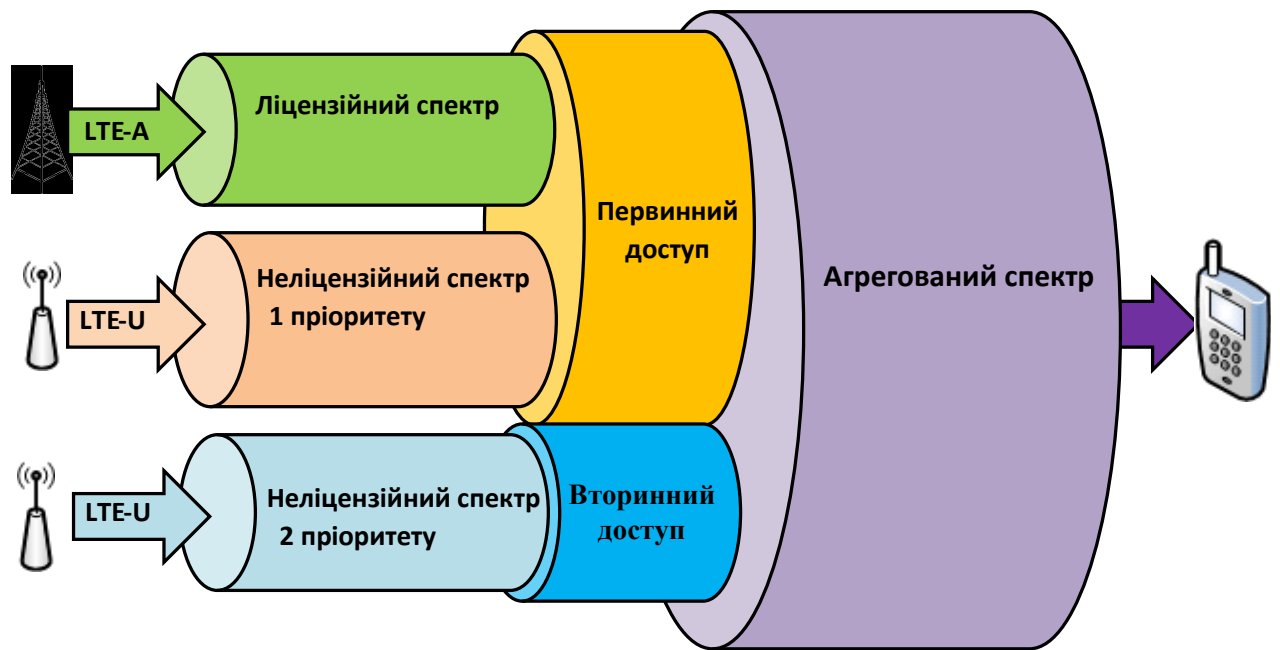


Рис. 2.12. Принцип агрегації пропускної здатності з трьох частотних діапазонів.

Розділимо агрегацію спектра на два етапи: первинний доступ до спектру і вторинний. У разі первинного доступу, оператор мережі може агрегувати весь доступний ліцензійний спектр з частиною неліцензійного спектра, який призначений цьому оператору. Принцип функціонування запропонованого алгоритму описаний нижче.

**Крок 1.** Виявлення вторинного неліцензійного спектра. Оператор мережі повинен перевірити як LTE, так і Wi-Fi передачі, тому що вони мають більш високий пріоритет для використання цієї смуги. Якщо є доступний спектр (тобто ні конкурентоспроможні LTE мережі, ні мережі Wi-Fi не використовують цю частину неліцензійної смуги), оператор мережі агрегує його для майбутньої передачі даних, а потім переходить до кроку 2. Якщо немає ніяких доступних смуг у вторинного неліцензійного спектра, перейдіть одразу до кроку 2.

*Зверніть увагу, наявність спектра перевірено, починаючи з тих смуг, що мають більш високу ймовірність перевантаження. Це важливо, тому що навіть в разі, коли весь неліцензійний спектр зайнятий, оператор буде як і раніше мати можливість надавати послуги через ліцензійний спектр.*

**Крок 2.** Перевірка наявності первинного неліцензійного спектра. При перевірці первинного неліцензійного спектра, оператор мережі має більш високий пріоритет доступу серед всіх операторів LTE. Проте, все ще існує необхідність перевірки активних передач Wi-Fi, для того, щоб уникнути перешкод, тому що Wi-Fi має більш високий пріоритет для використання цієї смугу. Тому, якщо є доступним спектр в первинній неліцензійній смузі, він об'єднується для майбутніх передач. В іншому випадку ця група ігнорується і алгоритм переходить до кроку 3.

**Крок 3.** Якщо немає ніяких агрегованих смуг в неліцензійному спектрі, оператор мережі повинен виділити необхідну смугу пропускання в ліцензійному спектрі для того, щоб надати користувачам негарантовану доставку. Якщо в неліцензійному спектрі є агреговані смуги, то оператор мережі повинен доповнити його необхідною кількістю ліцензованого спектру, але не менш надійним "якорем" групи, щоб забезпечити надійне з'єднання для отримання важливих даних (наприклад, дані сигналізації або чутливих до затримки даних). Потім алгоритм переходить до кроку 4.

*Зверніть увагу, що дуже важливо виділити достатню частину ліцензійного спектру, так як неліцензійний спектр не може бути надійним через високу ймовірність перешкод. Первинний неліцензійний спектр є більш надійним, ніж вторинний, так як оператор мережі повинен координувати свою передачу тільки з мережами Wi-Fi. Вторинні неліцензійні з'єднання менш надійні через більш низький пріоритет для доступу в порівнянні з іншими LTE мережами і мережами Wi-Fi.*

**Крок 4.** Оператор мережі об'єднує всі групи, отримані від попередніх кроків, і виконує передачу даних через три-діапазонний агрегований канал. За наявності кількох користувачів в цільовій зоні покриття, агрегована пропускна здатність справедливо розподіляється між ними, відповідно до їх вимог.



*Слід зазначити, що навіть після успішної агрегації несучої з неліцензійного спектра, оператор повинен звільнити неліцензійні смуги для наступного оператора, після того, як протокол CASLUA виявить більш високий запит пріоритету для цього спектра.*

Після успішного сеансу передавання даних, алгоритм повертається до кроку 1. Таким чином, для збільшення пропускної здатності, LTE оператор має змогу здійснювати агрегацію каналів у трьох вищезгаданих діапазонах, за умови наявності одночасного покриття макрокомірок та фемтокомірок. блок-схема алгоритму агрегації радіочастотних ресурсів, представлено на рис. 2.16.

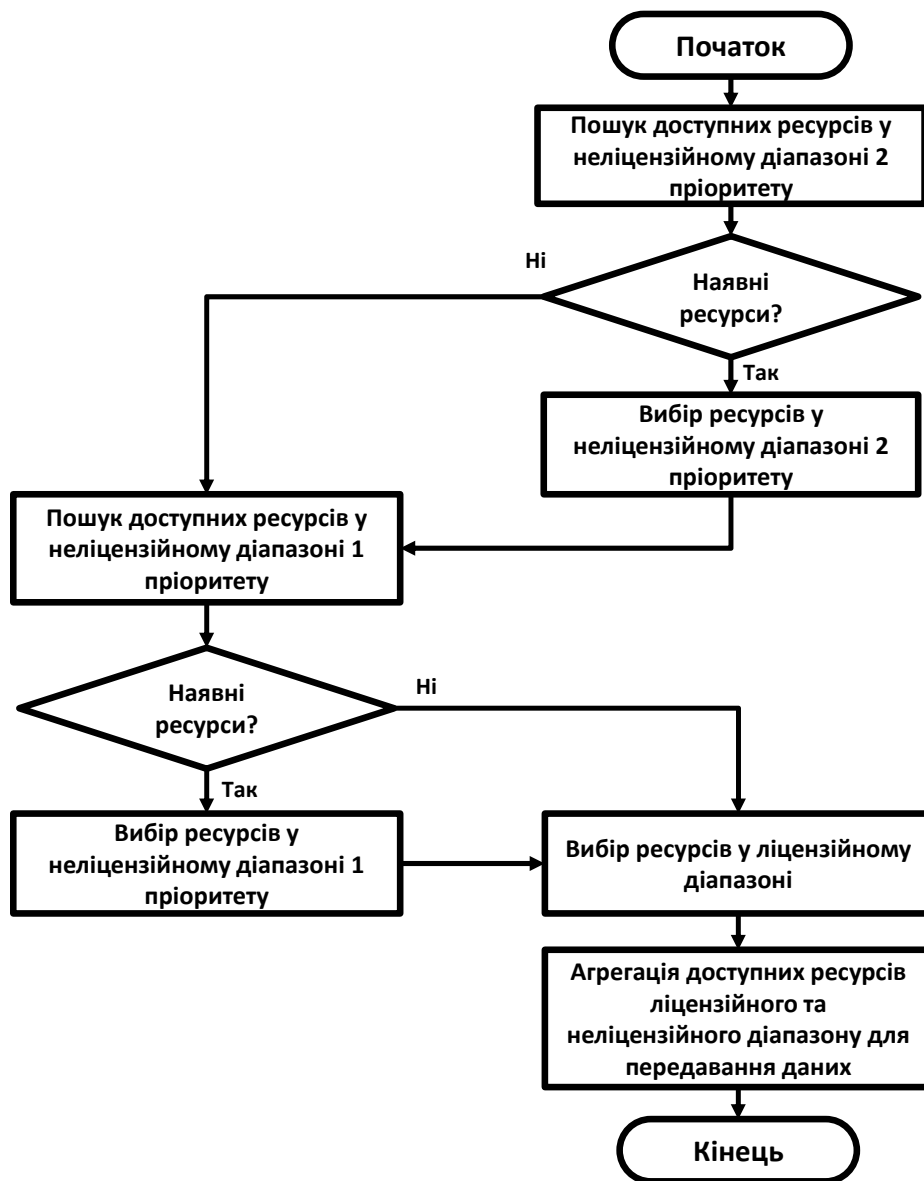


Рис. 2.13. Блок-схема алгоритму агрегації радіочастот в ліцензійному та неліцензійному діапазонах.

## 2.6. Метод координованого прослуховування середовища абонентами LTE на основі формування D2D груп

Важливим аспектом у безпроводних мережах з випадковим конкурентним доступом до каналу є розмір часового вікна в межах якого передавальна станція обирає випадковий інтервал очікування перед моментом передавання. Чим менше доступне часове вікно, тим меншими будуть інтервали простою мережі. Проте, при великій кількості конкуруючих передавальних станцій, ймовірність того, що два вузли одночасно виберуть однаковий інтервал очікування зростає, що призводить до зростання кількості колізій та рівня інтерференційних завад у мережі LTE. З іншого боку, надто великі значення часового вікна призводять до зниження ефективності системи за рахунок більших інтервалів очікування. Тому, при проектуванні мережі у неліцензійному частотному діапазоні важливо забезпечити якомога вище значення відношення розміру часового вікна до кількості конкуруючих вузлів. Існуючий принцип конкурентного доступу до середовища представлено на рис. 2.14.

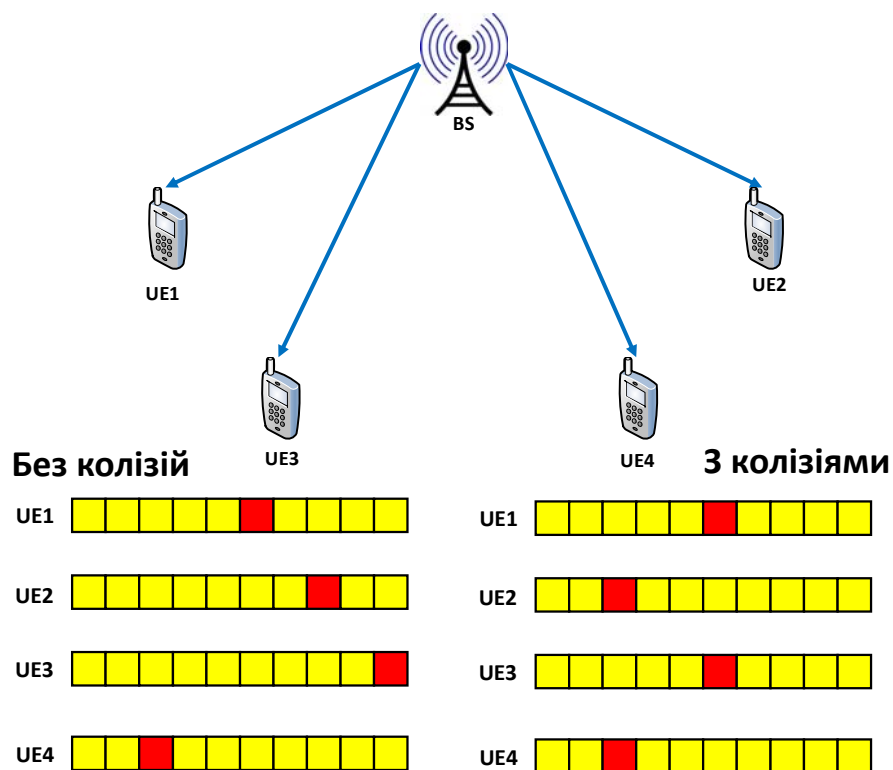


Рис. 2.14. Принцип конкурентного доступу абонентів до неліцензійного частотного діапазону.

Виділяють два методи зниження ймовірності колізії:

1. Збільшення розміру часового вікна, що дає змогу збільшити діапазон можливих значень інтервалу очікування для конкуруючих вузлів.

2. Зменшення кількості конкуруючих вузлів, що дає змогу зменшити ймовірність вибору однакових інтервалів очікування двома вузлами.

Спільним для обох випадків є те, що вони дають змогу збільшити відношення між кількістю доступних інтервалів очікування та кількістю конкуруючих вузлів. Проте, у першому випадку збільшується період простою мережі у зв'язку із більш тривалими інтервалами очікування. У другому випадку, обмежується кількість абонентів, які можуть одночасно використовувати неліцензійні радіочастотні ресурси.

Запропоновано новий метод випадкового доступу з координованим прослуховуванням середовища абонентами LTE, який базується на основі технології D2D (Device-to-Device). Технологія D2D дає змогу абонентським пристроям обмінюватись інформацією між собою без участі базової станції.

Конвергенція гетерогенних мереж з використанням технології міжтермінальної взаємодії, дає змогу підвищити спектральну ефективність за рахунок більш оптимального передавання інформаційних потоків від базової станції до абонентських пристроїв. Дана технологія передбачає, що тільки обмежене число мобільних терміналів буде зв'язуватися безпосередньо з базовою станцією (БС). Ці термінали називаються вузлами з прямим підключенням (ВПП). Інші вузли підключаються до ВПП як до точки доступу. Такі термінали називаються вузлами з опосередкованим підключенням (ВОП). Кожен термінал може працювати як ВПП або ВОП в залежності від поточних умов у каналі зв'язку. Основна відмінність цього підходу від існуючих рішень когнітивного радіо полягає у принципах реалізації радіоінтерфейсу. Сучасні когнітивні мережі використовують неліцензований спектр технології Wi-Fi та Bluetooth для зв'язку між терміналами. Проте, цього недостатньо для нових мобільних мереж з високою пропускнуою здатністю у зв'язку із обмеженою

кількістю доступних каналів. Тому, припускаємо альтернативний розв'язок проблеми, який передбачає спільне використання спектрального діапазону для міжтермінального обміну та зв'язку між ВПП та БС. ВПП безпосередньо отримує частотні ресурси від базових станцій. Абонент, який є фактичним власником даного ВПП використовує тільки частину інформаційного потоку для свого сеансу зв'язку. Решта інформації проходить транзитом через ВПП до всіх ВОП, використовуючи інші спектральні ресурси. В такому випадку використовується адаптивний метод повторного використання частотних ресурсів для того щоб уникнути інтерференції, покращити завадозахищеність та забезпечити належний рівень якості сприйняття послуг. Цей метод передбачає конвертування несучих частот у ВПП, для того щоб відокремити спектр передавання сигналів з базової станції до ВПП, від спектру який використовується в міжтермінальній мережі.

Дана властивість, використовується в запропонованому методі для організації абонентських груп, які координовано прослуховують середовище та приймають участь у боротьбі за доступ до радіочастотних ресурсів. При такому методі функціонування, з групи вибирається один вузол, який буде змагатися за доступ до неліцензійного радіочастотного діапазону.

Існуючі D2D мережі зазвичай використовують мережні протоколи Wi-Fi або Bluetooth. Проте, протоколи Wi-Fi та Bluetooth забезпечують набагато меншу пропускну здатність, ніж стандарт LTE-A. Для того, щоб підтримувати якість комунікації користувачів, незалежно від їх розташування, пропонується новий підхід до розподілення пропускну здатності рівномірно в межах комірки. В даному випадку для прослуховування середовища між множиною вузлів утворюється мережа, в якій один з вузлів виступає в ролі точки головного вузла. Цей вузол вибирається за критерієм якості каналу зв'язку та максимальної кількості сусідніх вузлів. Ця модель є аналогічною до моделі класичної гетерогенної мережі з відмінністю у тому, що малі комірки є динамічними і точкою доступу в них є один, або декілька терміналів. ВОП

приєднані до ВПП чи до інших ВОП за критерієм максимального відношення сигнал/шум.

Якщо головний вузол виграє боротьбу за канал, він автоматично резервує його для інших вузлів групи, які матимуть змогу здійснити передавання своїх даних у наступних підкадрах. Перевагою такого підходу є те, що більшість вузлів в мережі не приймає безпосередньої участі у конкурентній боротьбі за доступ до каналу, що дає змогу використовувати значно менше часове вікно при забезпеченні достатньо малого значення ймовірності появи колізій [13]. Оскільки ймовірність колізій залежить від співвідношення між розміром часового вікна та кількістю конкуруючих вузлів, можна зробити висновок, що збільшення розмірів груп призводить до зменшення кількості колізій за рахунок меншої кількості груп. З іншого боку, велика кількість вузлів у групі призводить до зростання часу очікування абонентів даної групи. Тому, вибір кількості груп та їх розміру залежить від балансування пропускної здатності та ймовірності появи колізій. Крім того, розмір групи також залежить від фізичної близькості вузлів, оскільки при зростанні відстані D2D з'єднань вузли можуть фізично знаходитись у різних зонах покриття, що не дає гарантій ефективного функціонування методу випадкового доступу. Запропонований метод координованого прослуховування середовища на основі технології D2D представлено на рис. 2.15.

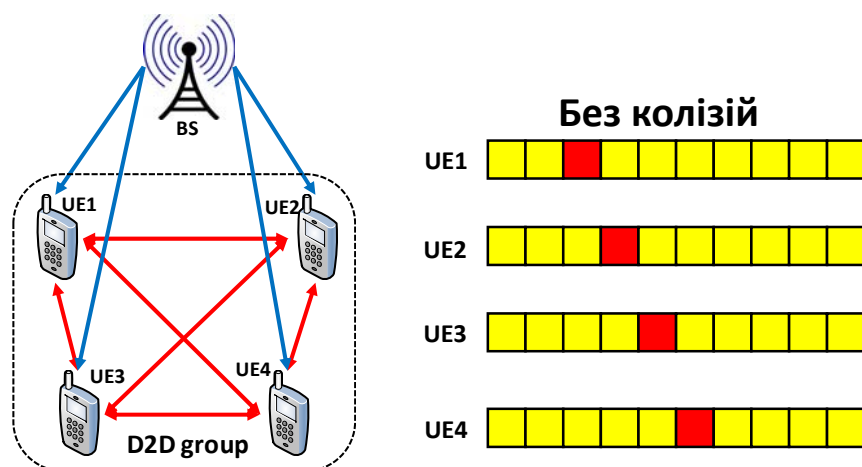


Рис. 2.15. Запропонований метод координованого прослуховування середовища на основі технології D2D.

## 2.7. Висновки до розділу

Вирішено задачу адаптивного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону мережами LTE за рахунок удосконалення методу випадкового доступу з прослуховуванням середовища шляхом його адаптації до структури кадру LTE на каналному рівні. На основі удосконаленого методу розроблено алгоритм адаптивного використання неліцензійних частотних каналів абонентами LTE.

Вирішено задачу спільного використання радіочастотних ресурсів при розгортанні мереж LTE кількома операторами мобільного зв'язку в неліцензійному частотному діапазоні. Для цього запропоновано модель спільного використання радіочастотних ресурсів кількома операторами мобільного зв'язку на основі теорії ігор, яка, на відміну від існуючих, враховує поточні потреби оператора у пропускну здатності, що дає можливість підвищити ефективність використання ресурсів в умовах одночасного функціонування мереж LTE різних операторів у неліцензійному частотному діапазоні. На основі запропонованої моделі розподілу розроблено алгоритм адаптивної агрегації радіочастот ліцензійного та неліцензійного діапазонів, який використовує логічне розділення радіочастотного ресурсу на три пріоритети доступу оператора.

Запропоновано метод випадкового доступу з координованим прослуховуванням середовища абонентами LTE. Особливістю запропонованого методу є групування абонентів у D2D кластери, що дає змогу знизити рівень інтерференційних завад у гетерогенній мережі мобільного зв'язку за рахунок зменшення кількості колізій між абонентами LTE у неліцензійному частотному діапазоні. На основі даного методу, розроблено алгоритм адаптивного вибору часового вікна, який використовує ортогональні значення адаптивного часового вікна для окремих D2D груп.

### РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РАДІОЧАСТОТНИХ РЕСУРСІВ У ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

#### 3.1. Дослідження пропускної здатності гетерогенних мереж мобільного зв'язку

Абонент може вибрати обслуговуючу базову станцію відповідно до прийнятої потужності опорного сигналу (RSRP). Слід зазначити, що абонент можливо, не знаходиться в тій макрокомірці, що його БС. Ці абоненти зазвичай розташовані на краю комірки. Розподіл користувачів має великий вплив на продуктивність системи. У макромережі, абоненти зазвичай рівномірно розподілені. Крім того, абоненти можуть бути розташовані занадто близько до їх обслуговуючих базових станцій [5].

Розглянемо двошарову малокоміркову мережу з невеликими комірками. Топологія кожної макрокомірки представлена на рис. 3.1. У макрокомірці, мікрокомірки розташовані поруч до обслуговуючої БС. Розташування мікро БС є одним з важливих факторів, що визначає системні рішення. У нашій моделі, дві мікро БС розташовані в кожному секторі [3,4,5,8,9].

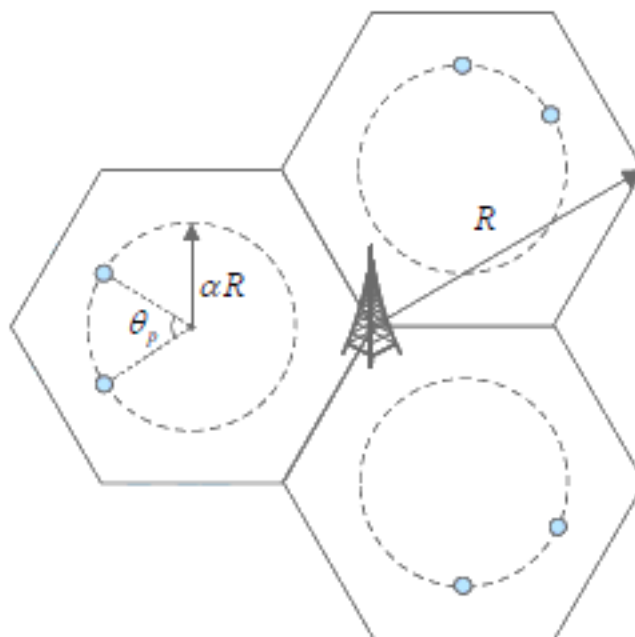


Рис. 3.1. Топологія двошарової малокоміркової мережі

Нехай мікрокомірки розташовуються у колі, центр якого збігається з центром сектора і симетричні по відношенню до антени макрокомірки. Є дві змінних параметра:  $\alpha$  і  $\theta_p$ , які представляють радіус кола і центральний кут окружності розгортання, відповідно.

Продуктивність мережі в різних малокоміркових мережах та розвиток технології її побудови, оцінюється за допомогою моделювання різних рівнів системи. Параметри малокоміркових мереж представлені в таблиці 3.1 [5, 132-134].

Таблиця 3.1

Параметри моделювання

Параметр	Значення
Схема мережі	3 сектори, гексагональні
ISD	50 м
Число макро БС	19
Макро користувачі	20 чол. На сектор
Розподіл користувачів	Рівномірний
Несуча частота	2 ГГц
Смуга пропускання	10 МГц
Потужність передавання макро БС / Коефіцієнт підсилення антени	46 дБм/14 дБі
Кількість антен на макро БС	2 передавальні, 2 приймальні
Антенна модель макро БС	три секторно напрямлені
Втрати при поглиннанні	20дБ
Втрати при поширенні для макро БС	$Pl(dB)=128.1+37.6\log_{10}R, R (км)$
Втрати при поширенні для мікро БС	$Pl(dB)=140.7+36.7\log_{10}R, R(км)$
Завмирання	Логнормальний розподіл
Кількість мікро БС	2 на сектор
Розташування мікро БС	Кола розташовані в центрі сектора
Мінімальна відстань користувача до мікро БС	3 м
Потужність передавання мікро БС / Коефіцієнт підсилення антени	30 дБм/5 дБі
Антенна модель мікро БС	Все напрямлена
Густина шуму	-174 дБ/Гц

Досліджуючи радіус і кут поширення можна отримати оптимальну продуктивність системи, проте здійснення цього дослідження є надто складним



тому доцільно окремо досліджувати кожен із параметрів. Коли радіус є фіксованою величиною, пропускна здатність може зростати або спадати залежно від зміни центрального кута. Крім того, варто взяти до уваги вплив часового або частотного домену координації міжкоміркової інтерференції в поєднанні зі зміною параметрів поширення.

Для досліджу приймаємо що,  $\theta_p = 60^\circ$ , середня пропускна здатність користувача і пропускна здатність на краю комірки користувача обчислюються, коли  $\alpha$  знаходиться в діапазоні від 0,2 до 0,5. Варто зазначити, що параметр  $\alpha$  не повинен бути занадто маленьким, в іншому випадку дві мікро комірки які знаходяться занадто близько один до одної створюватимуть занадто великі інтерференційні завади. Якщо  $\alpha = 0,5$ , коло є дотичним до гексагонального шестикутника.

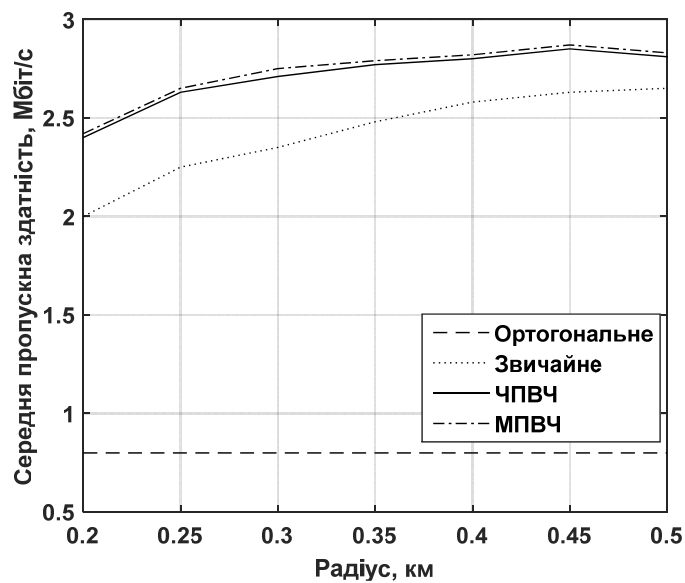


Рис. 3.2. Залежності середньої пропускної здатності від радіусу комірки для різних методів повторного використання частот

Як видно з рис. 3.2, використовуючи різні методи координації міжкоміркової інтерференції, пропускна здатність користувача малокоміркової мережі вища, ніж у традиційних мережах. Параметр продуктивності може навіть наблизитися до 100 або більше відсотків. Проте, на рис. 3.3, збільшення пропускної здатності користувача на краю комірки не так помітна при

використанні методу ортогонального розбиття спектру. Пропускна здатність користувача на краю комірки, коли  $\alpha$  є занадто маленьким або занадто великим, може бути навіть гіршою, ніж в традиційній мережі. Середня пропускна здатність і пропускна здатність на краю комірки користувача збільшується пропорційно до параметр  $\alpha$ , але коли  $\alpha$  досягне критичного значення стрімко почне спадати.

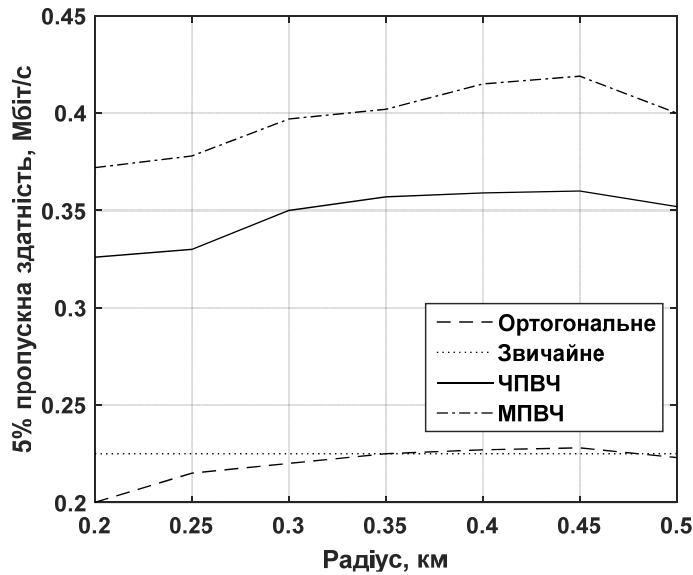


Рис. 3.3. Залежності пропускної здатності на краю комірки від радіусу для різних методів повторного використання частот

При низькому  $\alpha$ , дві БС мікрокомірок розташовані близько одна до одної. Отже, користувачі під'єднанні до першої мікро БС можуть отримувати сильні інтерференційні перешкоди від другої мікро БС. Ці користувачі матимуть низький параметр SINR, і, можливо, матимуть низьке значення пропускної здатності. Відстань між двома БС збільшується, якщо  $\alpha$  збільшується. Кількість користувачів під'єднаних до БС мікро комірки може зростати, якщо комірки не будуть перетинатися і знаходитимуться на відстані одна від одної. Це дозволить розподіляти навантаження на макро комірку і поліпшити її продуктивність. У ортогональній системі, пропускна здатність користувача на краю комірки перевершує традиційну одношарову мережу, коли параметр  $\alpha = 0,4$  чи  $\alpha = 0,45$ . Причиною поганої продуктивності мережі є те, що спектр частот, який

розподілений на мікро та макро БС є обмеженим. Крім того, при використанні методів часткового та м'якого повторного використання частот, якщо  $\alpha$  зростає відстань між двома БС мікрокомірок стає більшою. Проте важливим фактором є те, що користувачі мікро комірок отримують менші інтерференційні перешкоди від БС макрокомірки. Об'єднавши ці два фактори, бачимо що середня пропускна здатність і пропускна здатність на краю комірки покращилися. При  $\alpha=0,5$  коло дотичне до гексагонального шестикутника. БС мікро комірки в різних макро комірках розташовані набагато ближче. Звідси бачимо, що користувачі на краю комірки отримують більші інтерференційні перешкоди від інших БС мікрокомірок, які мають значний вплив на параметр SINR.

Із вище написаного можемо зробити висновок, що ефективна пропускна здатність системи досягається якщо  $\alpha=0,45$  та  $\theta_p=60^\circ$  в усіх трьох методах поділу спектру. Середня пропускна здатність всіх користувачів при повторному використанні частот дорівнює: 2.914, 2.860, 2.570 Мбіт, а при методах м'якого повторному використанню частот та ортогонального розбиття спектру середня пропускна здатність користувача на краю комірки дорівнюватиме 0,363, 0,411, 0,228 Мбіт. Хоча середня пропускна здатність, під час використання методу м'якого повторного використання частот, менша на 1,9%, ніж при використанню методу частковому повторному використанню частот, проте спостерігаємо що, його середня пропускна здатність користувача на краю комірки більша на 13,2%.

Як ми можемо спостерігати на рис. 3.4, коли параметр розширення зони покриття комірки дорівнює або більший 9 дБ, середня пропускна потужність користувачів краща чим без використання методу часового ущільнення координації міжкоміркової інтерференції. Проте, коли значення потужності перевищує 15 дБ, коефіцієнт підсилення середньої пропускної потужності обмежений, і якщо він опускається нижче 1,5% то значення потужності росте на 3дБ.

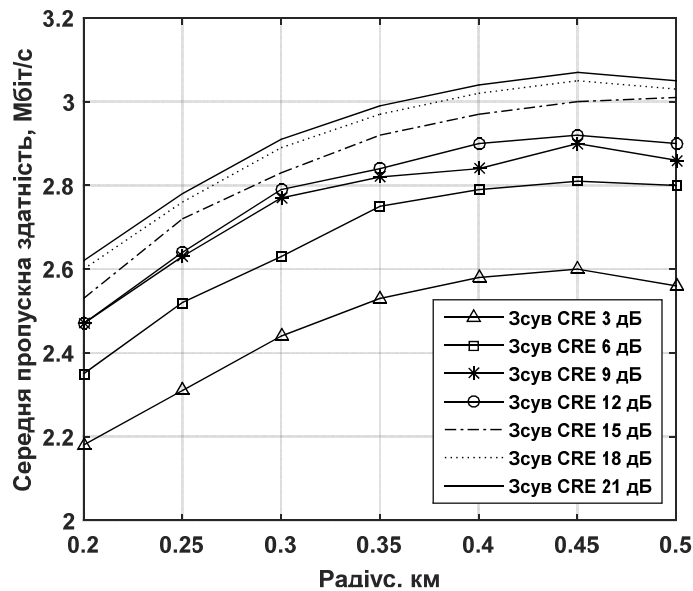


Рис. 3.4. Залежності середньої пропускної здатності від розширення зони покриття для різних методів повторного використання частот

Продуктивність часового ущільнення координації міжкоміркової інтерференції визначається, змінюючи радіус поширення комірки. Швидкість невикористовуваних підкадрів налаштована як  $\frac{1}{4}$ , це означає щомакро БС буде відключати передачу сигналу для  $\frac{1}{4}$  підкадра. Як і раніше припускаємо що, кут  $\theta_p = 60^\circ$ . Середня пропускна здатність користувача та пропускна здатність користувача на краю комірки досліджується, коли  $\alpha$  знаходиться в діапазоні від 0,2 до 0,5 при різних показниках параметра розширення зони покриття комірки.

Варто звернути увагу, що пропускна здатність користувача на краю комірки згідно рис. 3.5 залежить від радіуса комірки лише в тих випадках коли він вище 18 дБ або нижче 6 дБ. При використанні методу часового ущільнення координації міжкоміркової інтерференції, із збільшенням радіуса розширення, спостерігаємо, що пропускна потужність змінюється набагато швидше чим без координації міжкоміркової інтерференції. Хоча середня пропускна потужність і зміниться на краще, проте пропускна потужність на краю комірки буде зростати поки не досягне 12 дБ, після чого можемо спостерігати спад цього параметра. Це пояснюється тим, що чим більший радіус мікро комірки тим більше користувачів буде під'єднуватися до мікро БС, а менше до макро БС.

Дисбаланс який утворюється між навантаженнями на мікро та макро БС зменшує пропуску здатність користувача на краю комірки.

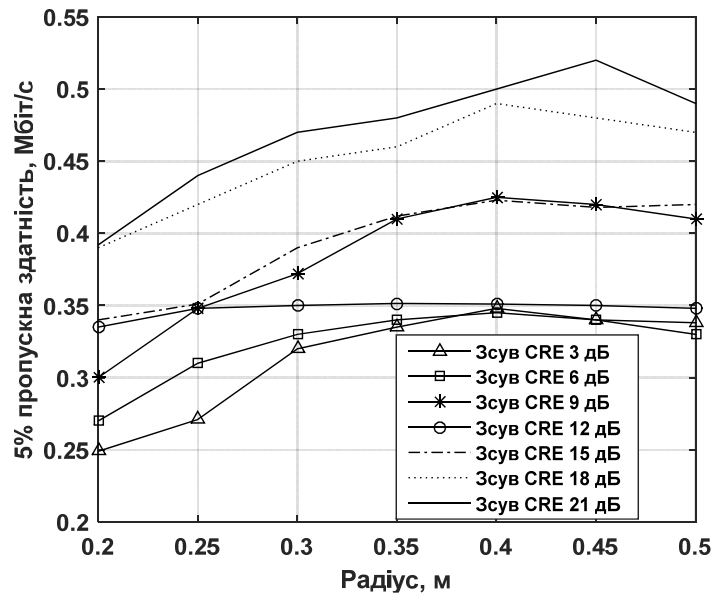


Рис. 3.5. Залежності пропускуної здатності на краю комірки від розширення зони покриття для різних методів повторного використання частот

Припустимо, що  $\alpha=0,45$ , дослідимо, як кут між двома мікро БС впливатиме на середню пропускуна здатність та пропускуна здатність на краю комірки. Продуктивність мережі зображено на рис. 3.6.

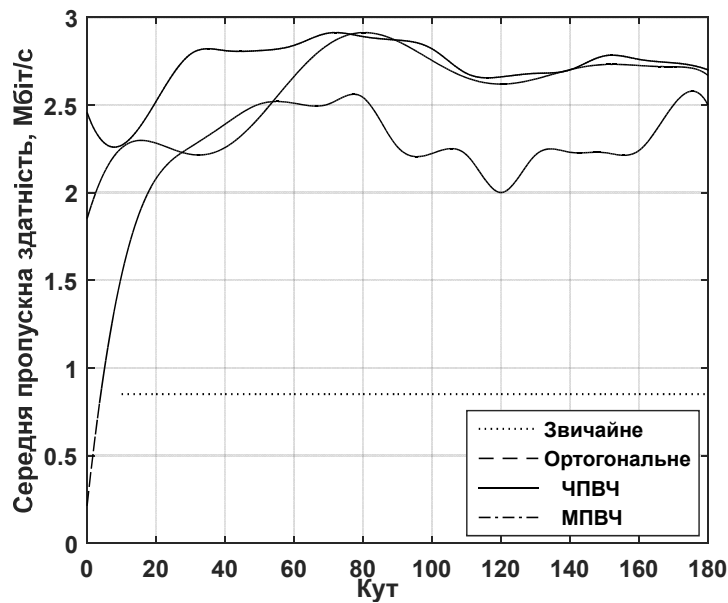


Рис. 3.6. Залежності середньої пропускуної здатності від кута поширення сигналу для різних методів повторного використання частот

Можемо зробити висновок, що коли кут є сталим, середня пропускна здатність користувача значно покращується порівняно із традиційними мережами зв'язку, проте зазнає значних змін, коли  $\theta_p$  змінюється. Пропускна здатність на краю комірки збільшиться, після розміщення мікро комірки за допомогою методів м'якого повторного використання частот та часткового повторного використання частот, проте не буде продуктивною з використанням методу ортогональності. Оскільки пропускну здатність на краю комірки використовують лише 5% користувачів, то вони мають найменше значення пропускну здатності. В традиційних мережах зв'язку такі абоненти знаходяться на краю макро комірки, а в малокоміркових мережах вони можуть знаходитися на краю мікро комірок за рахунок великих інтерференційних перешкод від макро БС. Коли  $\theta_p$  починає рости від нуля, то користувачі під'єнанні до однієї мікро БС можуть отримувати сильні інтерференційні перешкоди від іншої мікро БС, оскільки параметр  $\alpha$  зменшується. Інтерференційні перешкоди загасають після того, як  $\theta_p$  збільшуватиметься і досягне першого піку  $\theta_p = 60^\circ$ , проте, варто зазначити, що пропускна здатність зменшуватиметься. Це пояснюється тим, що користувачі які знаходяться далеко до БС отримують низький сигнал. Інтерференційні завади є сильнішими ніж пропускна здатність для користувачів на краю комірки, можемо спостерігати, коли кут значно збільшується, тоді сусідні мікро БС розташовуються ближче, що впливає на зменшення показника SINR, особливо у випадку коли кут досягне другого піку  $\theta_p = 120^\circ$ . Третій пік  $\theta_p = 160^\circ$ , мікро БС однієї комірки та сусідня мікро БС іншої комірки знаходяться на одній і тій ж відстані. Коли  $\theta_p = 180^\circ$  відстань між БС достатньо велика, проте макро користувачі не мають достатнього покриття. Оптимізована пропускна здатність досягається при  $\theta_p = 60^\circ$ , а  $\alpha=0,45$  при всіх трьох методах розподілу спектру частот.

Середня пропускна здатність для всіх користувачів дорівнює 2.914, 2.570, 2.860 Мбіт/с для методів часткового повторного використання частот, м'якого повторного використання частот та ортогональному розбитті спектру, пропускна здатність користувачів на краю комірки становитиме 0,364, 0,411, 0,228 Мбіт/с. Хоча при м'якому повторному використанні частот пропускна здатність нижча на 1,9% ніж при частковому повторному використанні частот, проте пропускна здатність користувача на краю комірки на 12,9% краща.

Для методу часового ущільнення координації міжкоміркової інтерференції, дослід відбувається коли швидкість невикористовуваних підкадрів рівна  $\frac{1}{4}$ , а кут буде змінюватися. Як зображено на рис. 3.7, якщо кут знаходиться в діапазоні від  $50^\circ$  до  $70^\circ$ , то розширення зони покриття комірки рівне або більше 9 дБ, спостерігаємо, що середня пропускна здатність краща без використання методу часового ущільнення координації міжкоміркової інтерференції.

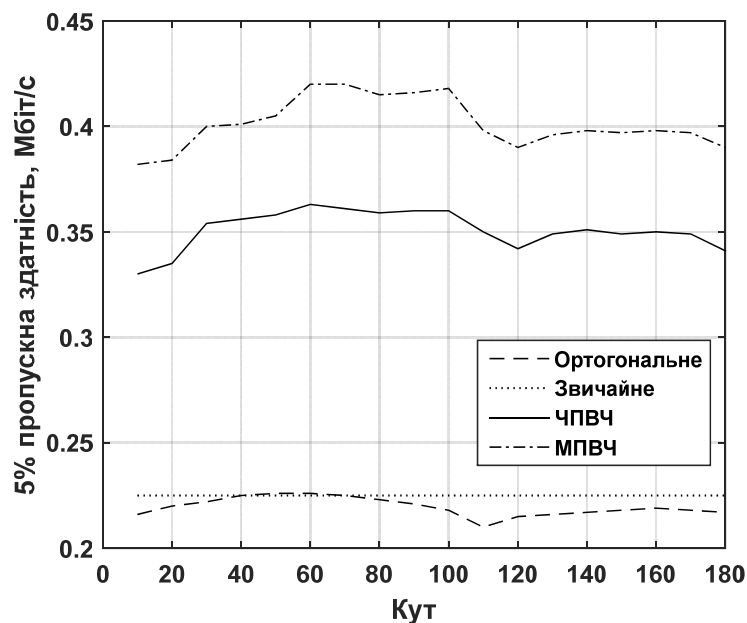


Рис. 3.7. Залежності пропускної здатності на краю комірки від кута поширення сигналу для різних методів повторного використання частот

Середня пропускна здатність досягає свого піку, коли  $\theta_p = 70^\circ$ , через те що саме дві мікро БС симетричні та покривають майже всіх користувачів мережі, які знаходяться між ними. Так само як і для радіуса покриття комірки.

Коли розширення перевищує 15 дБ, коефіцієнт підсилення середньої пропускної здатності буде менший за 1,3%. Можемо це спостерігати на рис 3.7, що втрати по пропускній здатності на краю комірки перевищують той вигравш який ми досягаємо для середньої пропускної здатності.

Для користувачів на краю комірки, їх ефективність гірша без використання методу часового ущільнення координації міжкоміркової інтерференції, оскільки значення розширення або надто велике (понад 18дБ), або надто низьке (менше 6 дБ). Коли ми змінюємо кут, пропускна здатність на краю комірки також починає змінюватися та само як частота координації міжкоміркової інтерференції. Тому рекомендується, щоб значення розширення зони покриття комірки знаходилося в межах 12 дБ, а  $\theta_p = 60^\circ$ , оскільки покриття збільшиться на 62,8% без використання методу часового ущільнення координації міжкоміркової інтерференції. Та на 6,2% коли значення розширення комірки рівне 9 дБ. Якщо значення розширення зони покриття комірки збільшується, то значно падає пропускна здатність на краю комірки. При  $\theta_p = 70^\circ$  втрати пропускної здатності дорівнюють 3%, порівнюючи при  $\theta_p = 60^\circ$ .

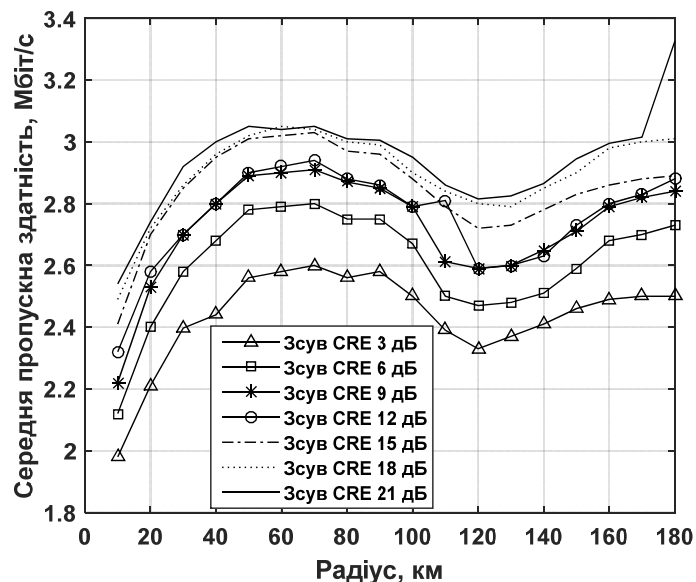


Рис. 3.8. Залежності середньої пропускної здатності від розширення зони для різних методів повторного використання частот.



На рис. 3.8 зображена швидкість доступу користувача (розширення зони покриття комірки для прикладу дорівнює 6 дБ, 12 дБ, 18 дБ). При великому розширенні зони покриття комірки, швидкість центральних користувачів збільшується із збільшенням радіуса комірки, проте кількість користувачів спочатку зменшується, а потім різко зростає. Така ситуація відбувається, через те, що коли радіус знаходиться в діапазоні 0,2-0,4, збільшуючи даний параметр більша кількість користувачів буде знаходитися в центральній зоні мікро БС, оскільки вони знаходилися поруч до БС. В діапазоні 0,4-0,5 більша кількість макро користувачів знаходяться в зоні покриття мікро БС.

Із результатів, ми можемо спостерігати, що оптимізована продуктивність часового ущільнення координації міжкоміркової інтерференції досягається при  $\alpha=0,45$ , а значення зміщення розширення зони покриття комірки рівне 12 дБ. Середня пропускна здатність всіх користувачів дорівнює 3 Мбіт/с пропускна здатність користувача на краю комірки 0,541 Мбіт/с. Якщо значення розширення більше, користувачі на краю комірки матимуть дуже низьку пропускну здатність і втрати сягатимуть 9%, середньої пропускну здатності 1,5% (по відношенню до значення розширення 15дБ) .

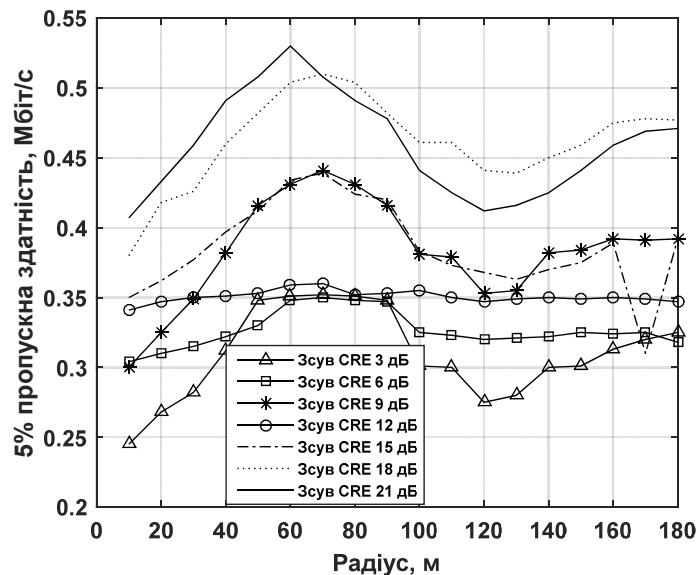


Рис. 3.9. Залежності пропускну здатності на краю комірки від розширення зони покриття для різних методів повторного використання частот.

Роблячи висновок з розрахунків, ефективна середня пропускна здатність і пропускна здатність на краю комірки досягаються, коли  $\theta_p = 60^\circ$ ,  $\alpha=0,45$ , значення розширення зони покриття комірки 12 дБ. Середня пропускна здатність користувачів дорівнює 2,987 Мбіт/с, пропускна здатність користувачів на краю комірки 0,564 Мбіт/с.

### 3.2. Експериментальне дослідження стану зайнятості радіочастотних ресурсів в неліцензійному частотному діапазоні

Для визначення перспектив використання неліцензійного частотного діапазону 5 ГГц для мереж LTE, необхідно дослідити поточну активність існуючих мереж в даному діапазоні. Для цього в роботі використано апаратні засоби, які мають змогу сканувати радіочастотний спектр для визначення тенденцій зайнятості каналів абонентами Wi-Fi та LTE.

На рис. 3.10. представлено загальний розподіл усіх можливих варіантів виділення радіочастотного спектру в діапазоні 5 ГГц для абонентів Wi-Fi. Характерною особливістю сучасних стандартів сімейства IEEE 802.11 є можливість адаптивного виділення смуги пропускання, яка може бути становити 20, 40, 80 або 160 МГц, в залежності від потреб конкретного користувача у пропускній здатності та поточного стану зайнятості радіочастотного спектру [5,9, 135,136].

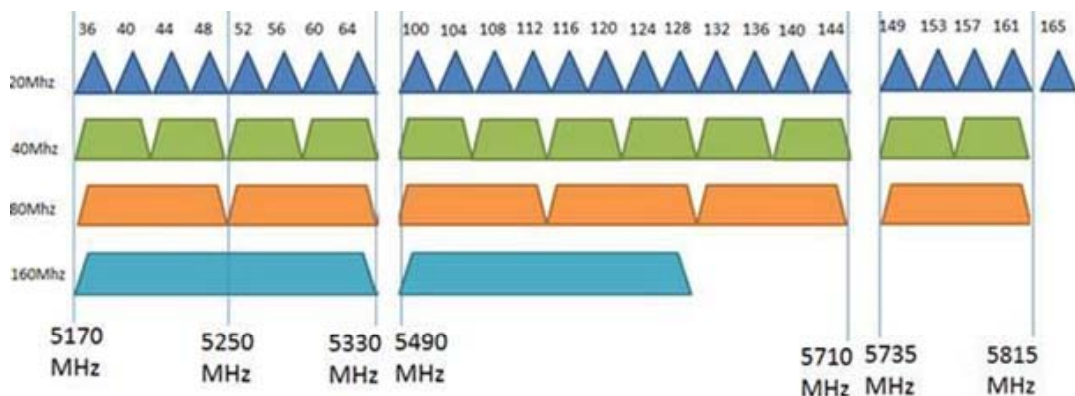


Рис. 3.10 Розподіл радіочастотних каналів мережі Wi-Fi при різних використовуваних частотних смугах

Отже, важливим аспектом при розгортанні мереж LTE в неліцензійному частотному діапазоні є модифікація точок доступу Wi-Fi для того, щоб вони залишали ширші частотні смуги для абонентів мережі LTE. Проте, в сучасних умовах розгортання, діапазон 5 ГГц характерний низькою активністю користувачів Wi-Fi, про що можна стверджувати на основі проведених досліджень (рис.3. 11).

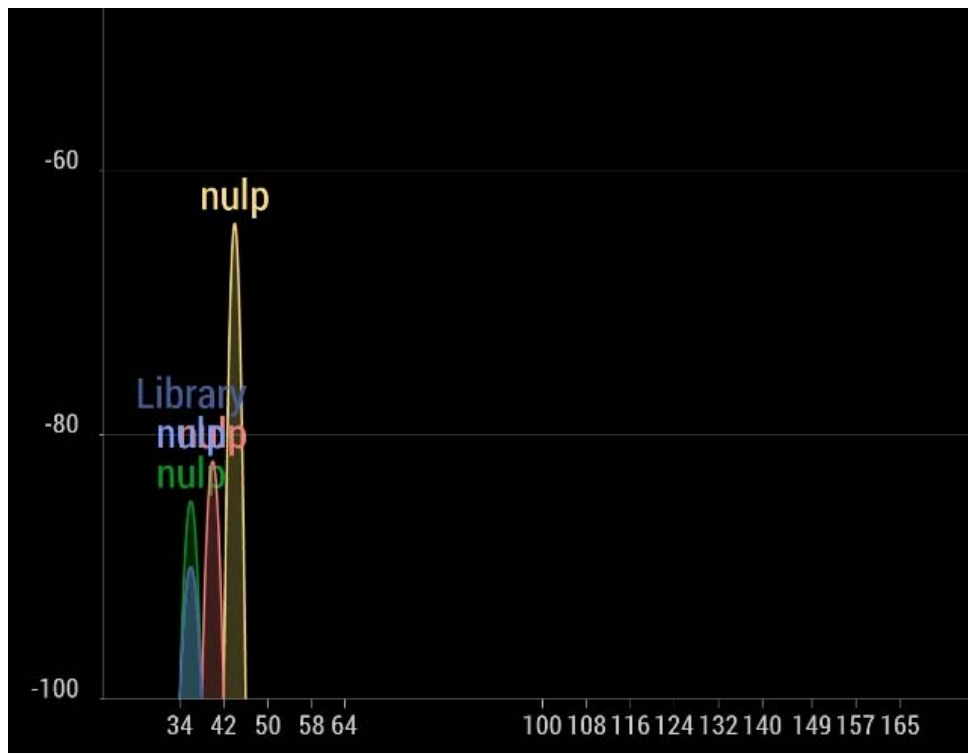
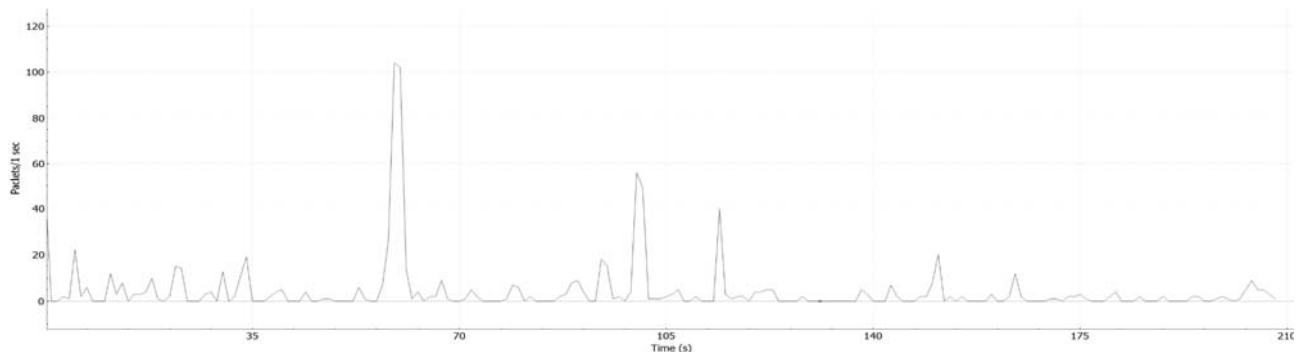
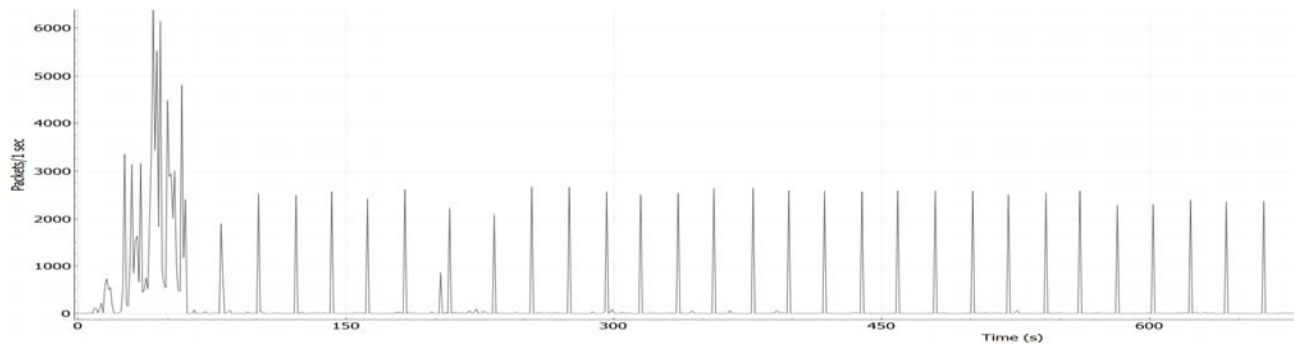


Рис. 3.11. Стан зайнятості радіочастотних каналів мережі Wi-Fi в діапазоні 5 ГГц

Крім того, проведено дослідження характеру поведінки абонента в мережі в залежності від типу послуг, які він використовує. Як можна побачити з рис. 3.12.а, абоненти які використовують веб-сервіси характеризуються неоднорідністю моментів доступу до середовища, в той час як активність абонентів, які використовують сервіси потокового відео (наприклад YouTube) легко спрогнозувати за характерними періодичними моментами буферизації (рис. 3.12.б).



а)



б)

Рис. 3.12. Порівняння активності абонентів для веб-серфінгу – а) та для перегляду потокового відео.

Для того, щоб оцінити необхідний обсяг радіочастотних ресурсів для розгортання мереж LTE в неліцензійному частотному діапазоні, проведено експериментальне вимірювання існуючих мереж LTE на основі програмно-конфігурованого радіомодуля USRP 2900.

USRP-2900 – це універсальний периферійний SDR модуль (Universal Software Radio Peripheral, USRP), виробництва компанії National Instruments, що може здійснювати прийом та передавання радіосигналів в діапазоні від 70 МГц до 6 ГГц з максимальною шириною смуги 56 МГц. Завдяки своїм характеристикам, дана платформа дозволяє працювати в багатьох сферах обробки та генерування сигналів, таких як GSM, CDMA, LTE, Wi-Fi, FM-радіомовлення, тощо. Основні технічні характеристики використаного радіомодуля наведені в таблиці 3.2.

## Основні технічні характеристики USRP-2900

<b>Передавач</b>	
Частотний діапазон	70 МГц – 6 ГГц
Крок зміни частоти	< 1 кГц
Максимальна вихідна потужність	20 дБм
Діапазон зміни потужності	89,75 дБ
Крок зміни потужності	0,25 дБ
Точність частоти	$2,5 \cdot 10^{-6}$ Гц
Максимальна ширина спектру, яку можна обробити в реальному часі	56 МГц
Частота вибірок в безперервному режимі	$15 \cdot 10^6$ вибірок/с
Розрядність ЦАП	12 біт
<b>Приймач</b>	
Частотний діапазон	70 МГц – 6 ГГц
Крок зміни частоти	< 1 кГц
Діапазон зміни чутливості	76 дБ
Крок зміни чутливості	1.0 дБ
Максимальна вхідна потужність	-15 дБ
Коефіцієнт шуму	5-7 дБ
Точність частоти	$2,5 \cdot 10^{-6}$ Гц
Максимальна ширина спектру, яку можна обробити в реальному часі	56 МГц
Частота вибірок в разовому режимі	$61,44 \cdot 10^6$ вибірок/с
Розрядність АЦП	12 біт

Структурна схема експериментальної моделі передавального та приймального пристрою на основі середовища Matlab, представлена на рис. 3.13 та 3.14.

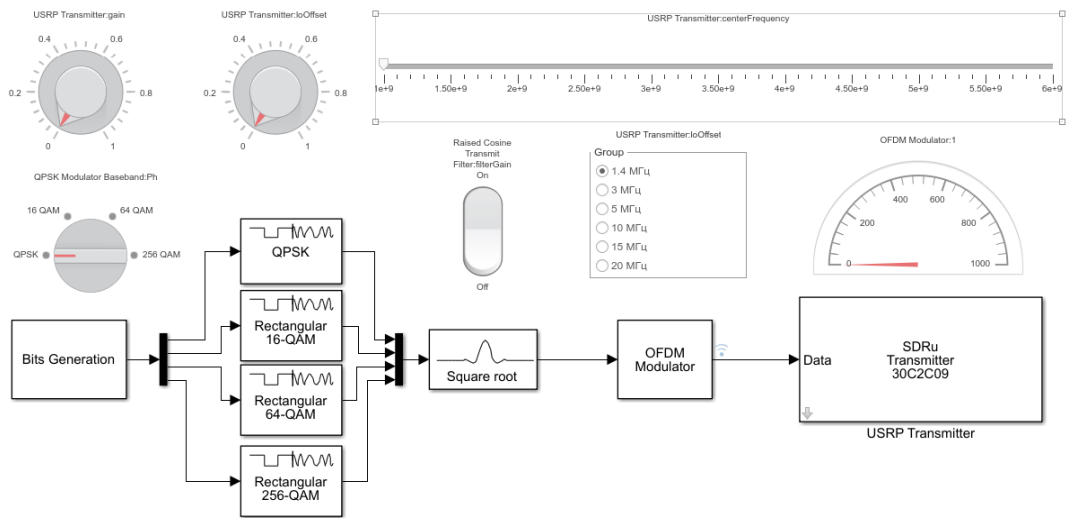


Рис 3.13. Структурна схема експериментальної моделі програмно-керованого передавального пристрою

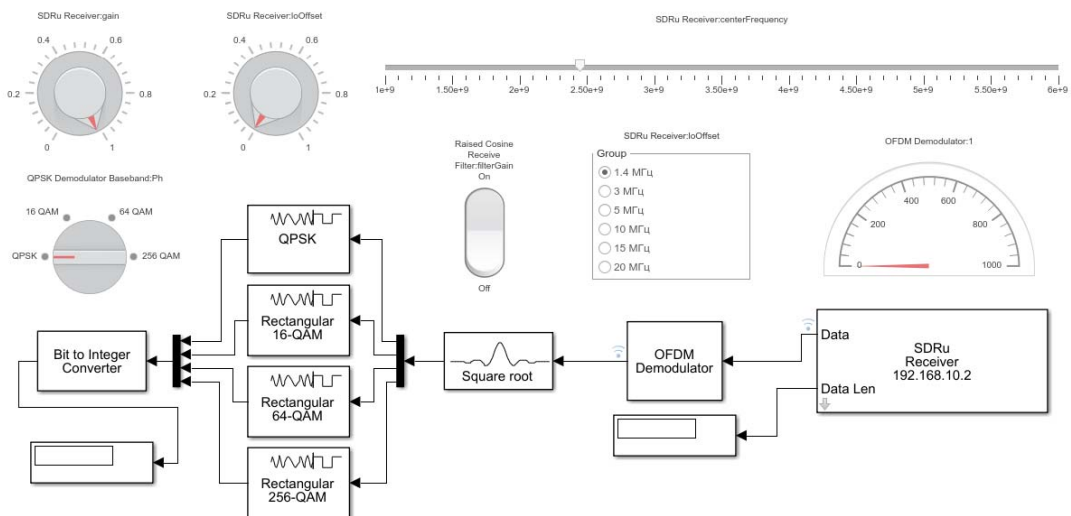


Рис 3.14. Структурна схема експериментальної моделі програмно-керованого приймального пристрою

На рис. 3.15-3.16 представлено результати сканування спектру мережі LTE в частотній смузі 30 МГц. Як можна побачити з отриманих результатів,

досліджувана мережа працює в трьох відокремлених смугах по 4 МГц, із смугами розфільтовки шириною 1 МГц. З даного результату можна зробити висновок, що для того щоб ефективно реалізувати стратегію використання неліцензійного спектру, операторам необхідно буде забезпечити щонайменше 6 МГц вільного спектру, що є цілком прийнятним в існуючих умовах зайнятості спектру.

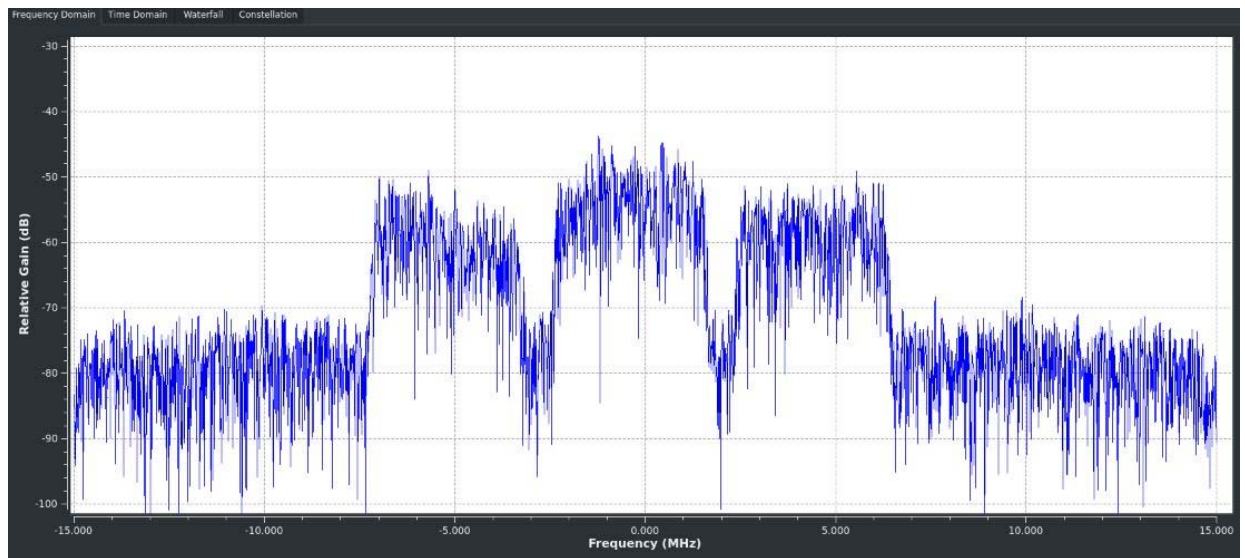


Рис. 3.15. Результати сканування спектру низхідного каналу в діапазоні 30 МГц

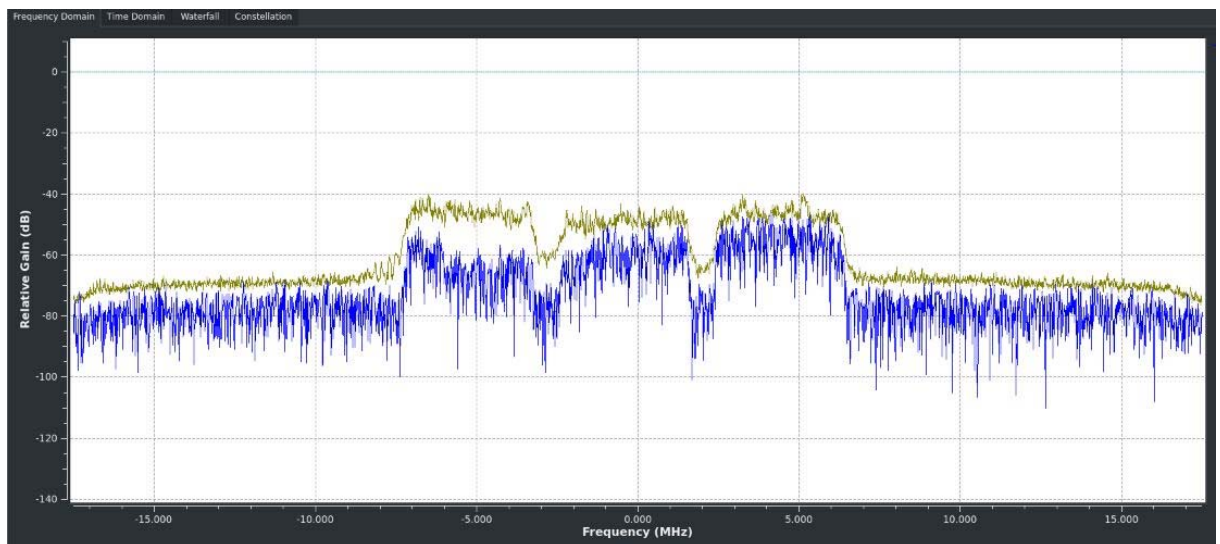


Рис. 3.16. Результати сканування спектру низхідного каналу в діапазоні 30 МГц з усередненням рівня сигналу.

На рис. 3.17, представлено частотно-часову спектрограму для дослідження залежності зайнятості частотних каналів в часі. Як видно з результатів, в низхідному каналі, базові станції LTE постійно передають інформацію до абонентів, з їх розділенням на основі часової рамки.

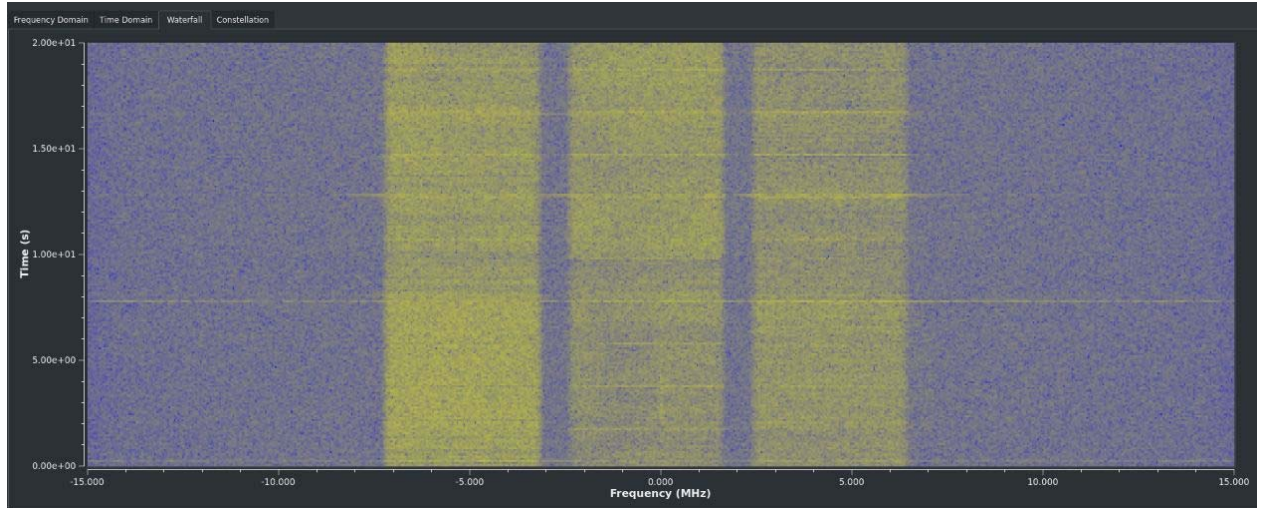


Рис. 3.17. Частотно-часова спектрограма для дослідження залежності зайнятості низхідних частотних каналів в часі.

На рис. 3.18 представлено результати сканування спектру мережі LTE у висхідному каналі в частотній смузі 15 МГц. Як можна побачити з отриманих результатів, у висхідному каналі LTE працює в трьох відокремлених смугах по 4 МГц, із смугами розфільтровки шириною 1 МГц. Проте, на відміну від низхідного каналу, у висхідному каналі абоненти не займають канал неперервно, що дає змогу більш ефективно використовувати неліцензійний частотний діапазон.

Для більш повного розуміння стану зайнятості каналів операторами LTE, проведено сканування спектру в діапазоні 60 МГц. З рис. 3.19 можна побачити дві окремі смуги по 15 МГц, між якими є 30 МГц незайнятого спектру. Відповідно, можна зробити припущення, що дані смуги належать двом різним операторам LTE.



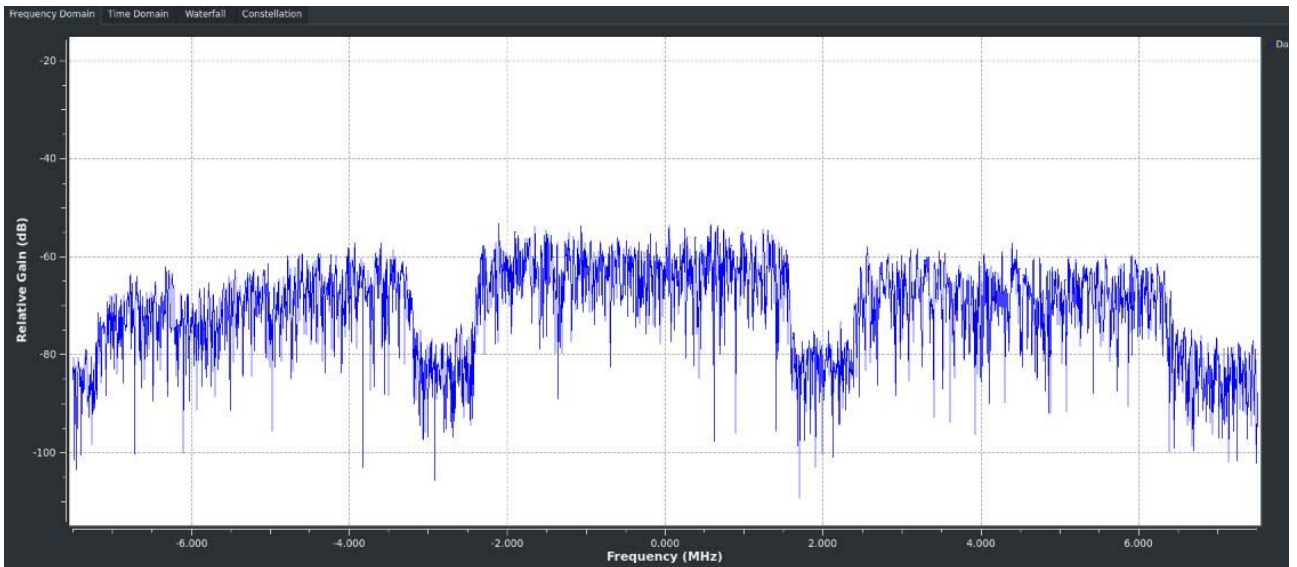


Рис. 3.18 Результати сканування спектру висхідного каналу в діапазоні 15 МГц.

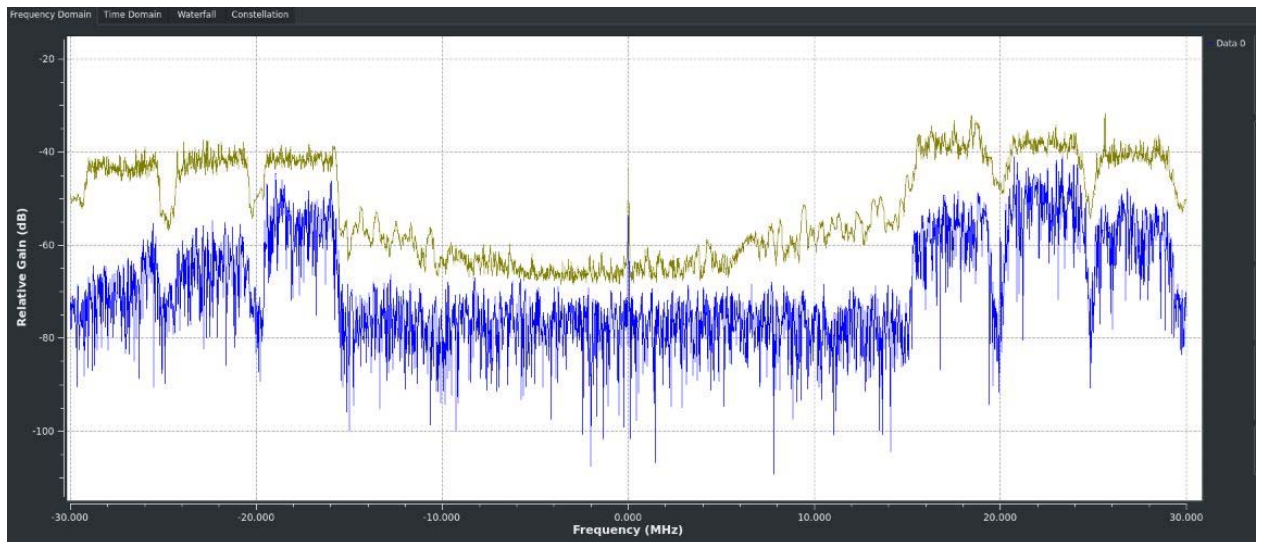


Рис. 3.19. Результати сканування спектру низхідного каналу в діапазоні 60 МГц з усередненням рівня сигналу.

Смуга розфільтровки для забезпечення надійності передачі даних залишається незмінною, як і у попередньому дослідженні – 1 МГц. Для підтвердження даної інформації, спостереження проводилось протягом певного часу, і отримано відповідну частотно-часову спектрограму рис. 3.20. Аналогічно до попередніх результатів, з рис. 3.16 можна зробити висновок, що процес транслявання сигналу в низхідному каналі мережі LTE є неперервним.

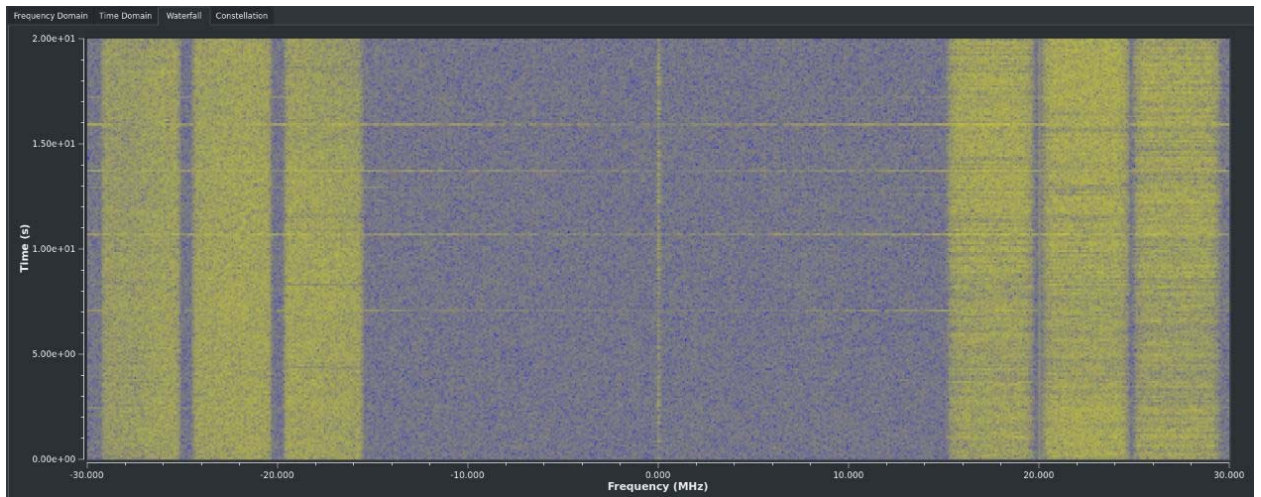


Рис. 3.20. Частотно-часова спектрограма для дослідження залежності зайнятості низхідних частотних каналів в часі.

### 3.3. Моделювання методу адаптивного використання радіочастотних ресурсів в гетерогенних мережах LTE/Wi-Fi

Також проводиться моделювання для отримання інформації про продуктивність співіснування Wi-Fi і LAA в неліцензійній смузі при різних імітаційних конфігураціях. Ми розглядаємо двохшарове розміщення комірок, по одному для WiFi і LAA, як показано на рис 3.21., покриття мереж LTE та Wi-Fi співпадає.

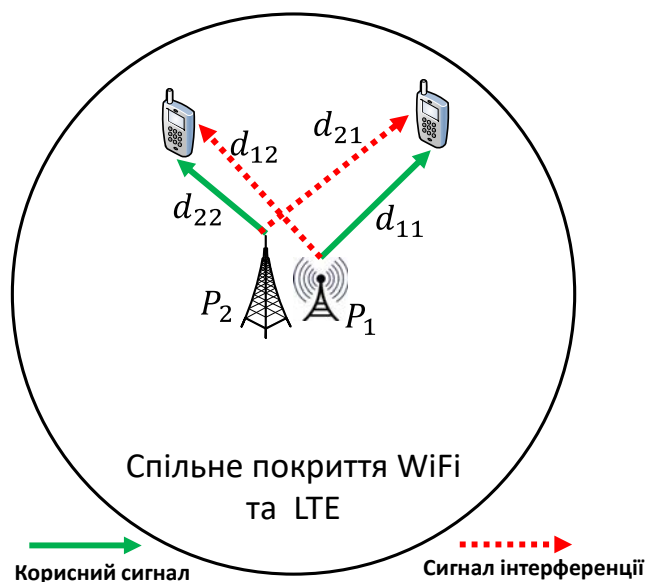


Рис. 3.21. Сценарій моделювання гетерогенної мережі при співіснуванні покриття LTE та Wi-Fi в неліцензійному частотному діапазоні.

Для моделювання вибираємо метод з часовим дуплексом TDD. В моделюванні часові кадри LTE та LAA повністю синхронізовані. Всі параметри LTE MAC / PHY, використовувані в симуляторі, наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3.

Параметри каналного рівня LTE.

Параметр	Величина
Схема передачі	OFDM
Ширина смуги	20 МГц
Потужність DL $T_x$	23 дБм
Потужність UL $T_x$	TPC на основі PL
Довжина кадру	10 мс
Планування	Кругове
$P_0$	-106 дБм
$\alpha$	1
TTI	1 мс
Модель трафіку	Модель трафіку FTP 2

У даному підрозділі представлені результати моделювання, отримані для різних сценаріїв співіснування WiFi і LAA. У всіх цих сценаріях ми зосереджуємося на продуктивності центральної комірки як в моделі Wi-Fi, так і в LAA. Режим TDD в LTE може бути налаштований на різну кількість підкадрів DL і UL для підтримки різних умов трафіку.

Для визначення ефективності удосконаленого методу випадкового доступу, проведено моделювання процесу обслуговування абонентів в умовах одночасного функціонування мережі LTE та мережі Wi-Fi в цільовій зоні обслуговування [13]. Отримано результати співвідношення потужності сигналу до сумарного значення шуму та інтерференційних завад (SINR) в приймальних абонентських пристроях (рис. 3.22) та пропускної здатності (рис. 3.23).

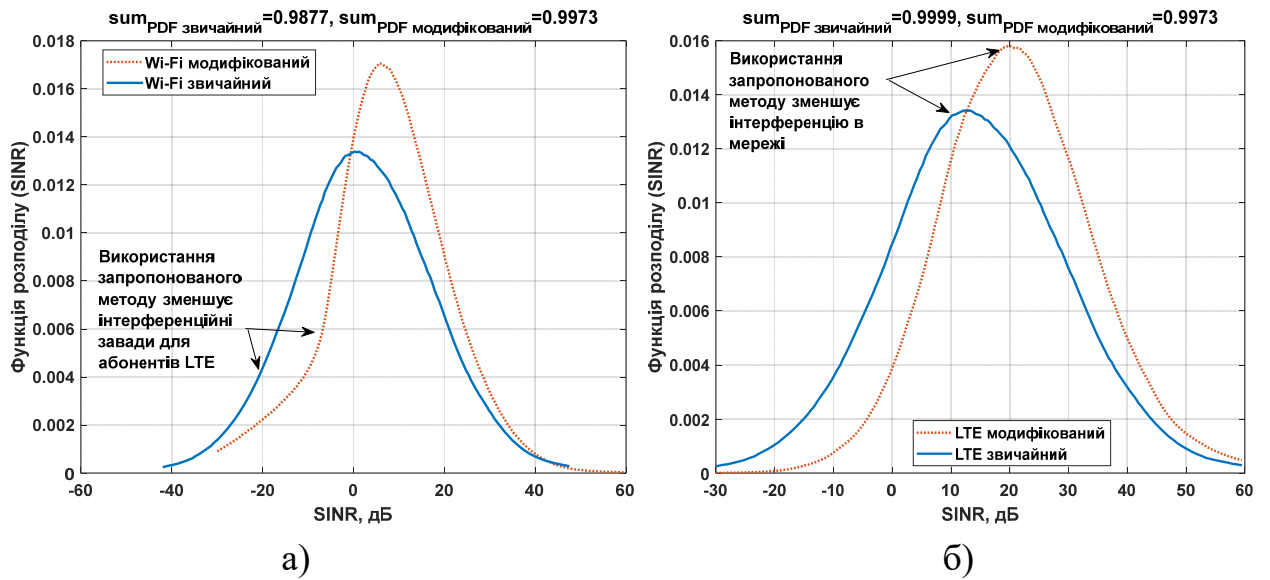


Рис. 3.22. Результати порівняння густини розподілу ймовірностей значень SINR при традиційному та удосконаленому методах випадкового доступу для користувачів Wi-Fi – а) та користувачів LTE – б).

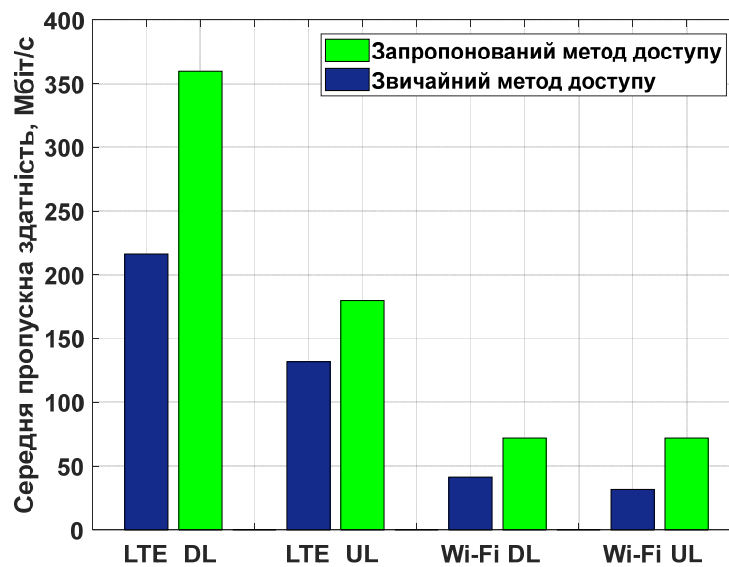


Рис. 3.23. Результати порівняння пікової пропускної здатності для абонентів LTE та Wi-Fi

Отримані результати показали перевагу запропонованого методу точки зору інтерференційних завад між мережами Wi-Fi та LTE. Як можна побачити із результатів на рис. 3.22.а та рис. 3.22. б, при використанні запропонованого методу значення SINR для абонентів LTE та Wi-Fi є вищими у 5-10 разів, за рахунок зниження кількості колізій у гетерогенній мережі, що в свою чергу дає

перевагу з точки зору пропускної здатності на 40%. Це досягається за рахунок адаптації інтервалів прослуховування середовища до структури кадру LTE. Спочатку передавальна станція LTE прослуховує середовище протягом інтервалу, кратному 1 мс, що відповідає стандартному підкадру LTE. Якщо протягом одного з підкадрів канал звільняється, передавальна станція починає обслуговування абонентів з наступного підкадру до кінця кадру тривалістю 10 мс. Таким чином, протягом одного циклу адаптивного доступу, передавальна станція LTE обслуговує до 9 абонентів у одному частотному каналі, зменшуючи таким чином кількість циклів випадкового доступу, і, як наслідок, інтерференційних завад між мережами Wi-Fi та LTE. Відповідно, з рис. 3.23.

### 3.4. Моделювання процесу спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону кількома операторами LTE

Крім того, у розділі проведено моделювання гетерогенної мережі в умовах спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону трьома операторами LTE. Моделювання проводилось на основі запропонованої ігрової моделі розподілу радіочастотних ресурсів (рис.3.24) [14].

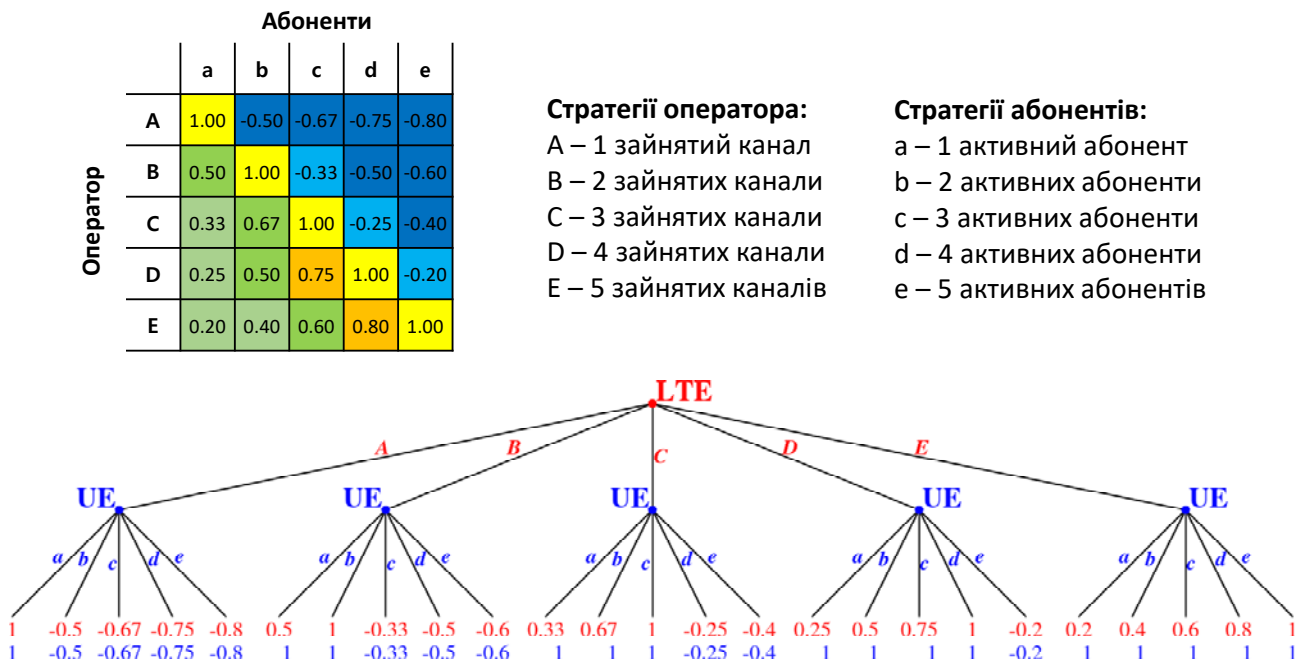


Рис. 3.24. Ігрова модель процесу резервування та використання частотних ресурсів

У ліцензійному спектрі ми припускаємо що кожен оператор може обслуговувати користувачів або з макрокомірками чи малими комірками які можуть бути узгоджені між собою для уникнення перешкод. Проте в не ліцензованому спектрі, так як всі оператори спільно поділяють спектральні ресурси, ми припускаємо що всі оператори утворюють тимчасовий союз, який дозволяє операторам ефективно розділяти спектральні ресурси шляхом обчислень значень вектора Шеплі. Результати моделювання представлені на рис. 3.25 – 3.26 [14, 19].

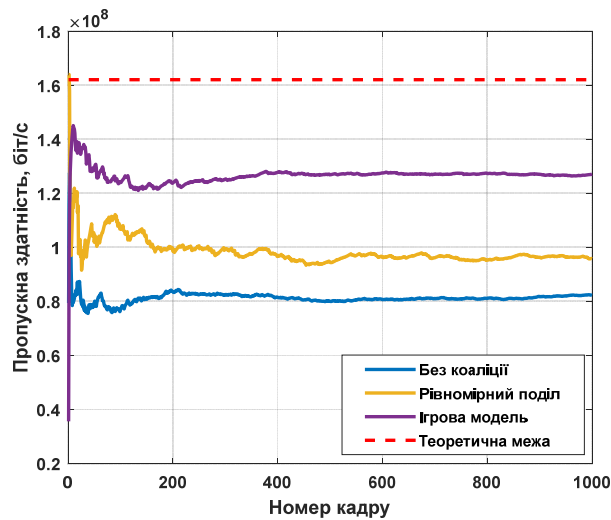


Рис. 3.25. Результати пропускної здатності при ігровій моделі спільного використання ресурсів.

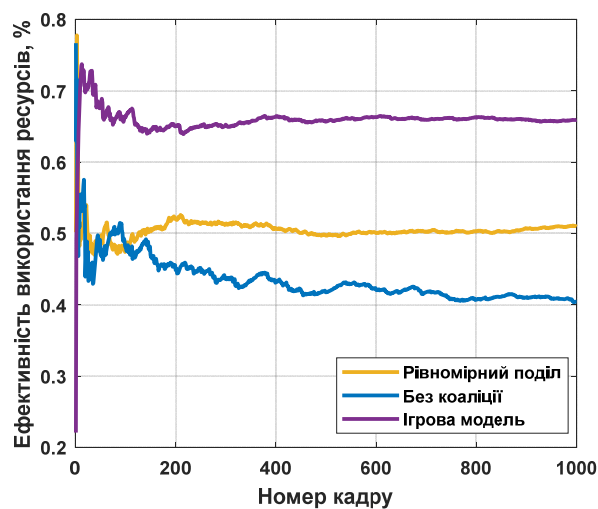


Рис. 3.26. Результати ефективності використання радіочастотних ресурсів при ігровій моделі спільного використання ресурсів.

### 3.5. Моделювання методу випадкового доступу з координованим прослуховуванням середовища на основі технології D2D

Для дослідження ефективності функціонування запропонованого методу випадкового доступу з координованим прослуховуванням середовища абонентами LTE на основі технології D2D, проведено моделювання для різних сценаріїв. Моделювання проводилось для 100 абонентів та 1000, що є в межах типових випадків для комірок у міському середовищі. На рис. 3.27 представлено результати порівняння ймовірності виникнення колізій в мережі для випадків незалежного прослуховування та для випадку координованого прослуховування з об'єднанням D2D груп. Отримані результати показали, що ймовірність колізії між абонентами LTE та Wi-Fi знижується у 3 рази, для випадку груп з двох абонентів (рис.3.27.а), і до 10 разів, для випадку груп з чотирьох абонентів (рис.3.27.б). Подальше зростання розміру D2D груп дає змогу повністю уникнути колізій, проте такий підхід призводить до суттєвого зростання затримки доступу для всіх абонентів [13].

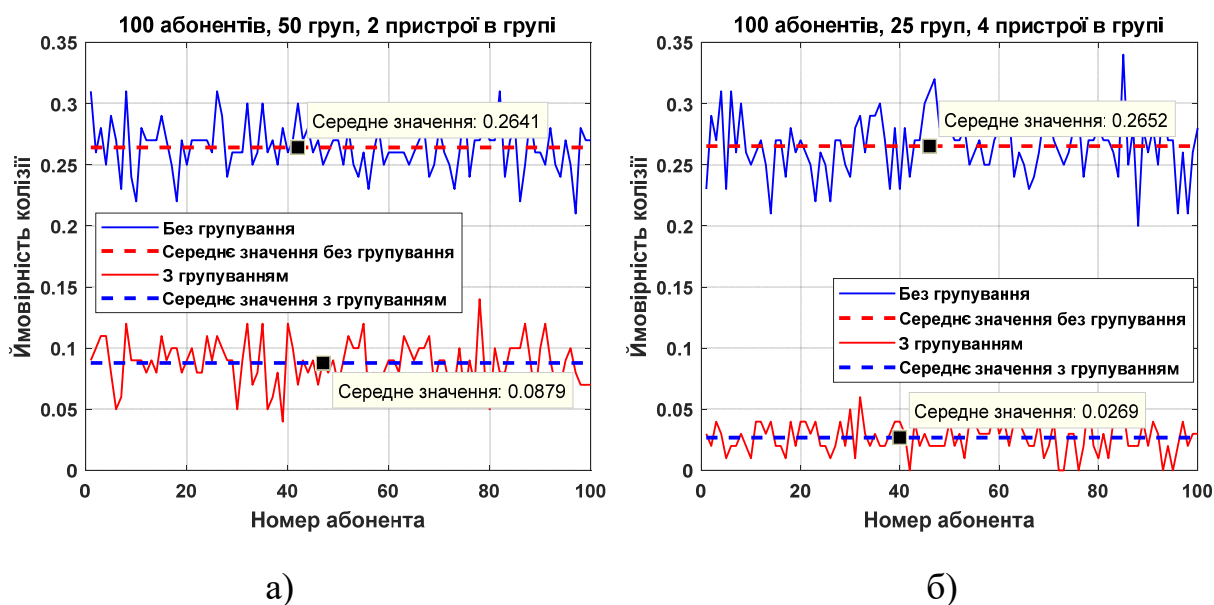


Рис. 3.27. Порівняння ймовірності колізій для існуючого та запропонованого методів доступу при 2 абонентах в D2D групі – а) та при 4 абонентах в D2D групі – б).

Аналогічні результати для випадку 1000 абонентів, представлені на рис. 3.28.

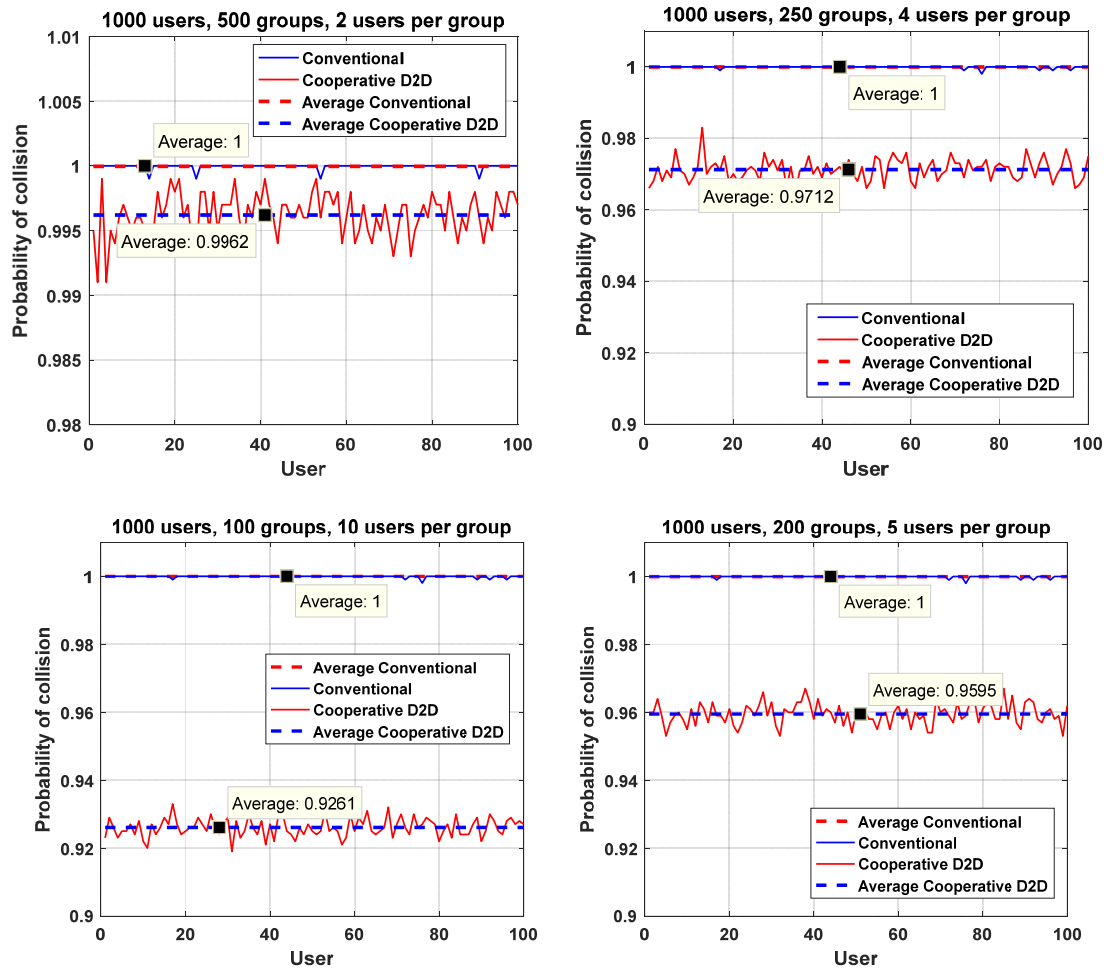


Рис. 3.28. Порівняння ймовірності колізій для існуючого та запропонованого методів доступу для різної кількості груп.

### 3.6. Моделювання алгоритму агрегації частотних діапазонів в ліцензійному та неліцензійному спектрі

Пропускна здатність користувача  $C_{UE}$ , досягається за рахунок найкращого підбору агрегації несучих і може бути обчислена в такий спосіб:

$$C_{UE} = l \log_2(1 + SINR_l) + p \log_2(1 + SINR_p) + s \log_2(1 + SINR_s), \quad (3.1)$$

де  $l$  – смуга пропускання, що виділяється користувачу в ліцензійному спектрі,  $p$  – канали пропускну здатності, виділені для користувача в первинному неліцензійному спектрі,  $s$  – пропускна здатність, виділена для користувачів у



вторинному неліцензійному спектрі,  $SINR_l$ ,  $SINR_p$ ,  $SINR_s$  – відношення сигналу до перешкоди плюс шум для кожної з виділених груп.

Смуга пропускання мобільного оператора  $C_{MNO}$ , що розраховується так:

$$C_{MNO} = \sum_i l_i \log_2(1 + SINR_i) + \sum_j p_j \log_2(1 + SINR_j) + \sum_k s_k \log_2(1 + SINR_k), \quad (3.2)$$

Де  $l_i$  – розподілена смуга частот для операторів в ліцензійному спектрі,  $p_j$  – розподілена смуга частот для операторів в первинному неліцензійному спектрі,  $s_k$  – розподілена смуга частот для операторів у вторинному неліцензійному спектрі,  $SINR_i$ ,  $SINR_j$ ,  $SINR_k$  – відношення сигналу до перешкоди плюс шум для кожної з виділених груп.

Загальна смуга пропускання  $C_{total}$  для двох операторів мобільної мережі, які ділять між собою неліцензійний спектр розраховується як:

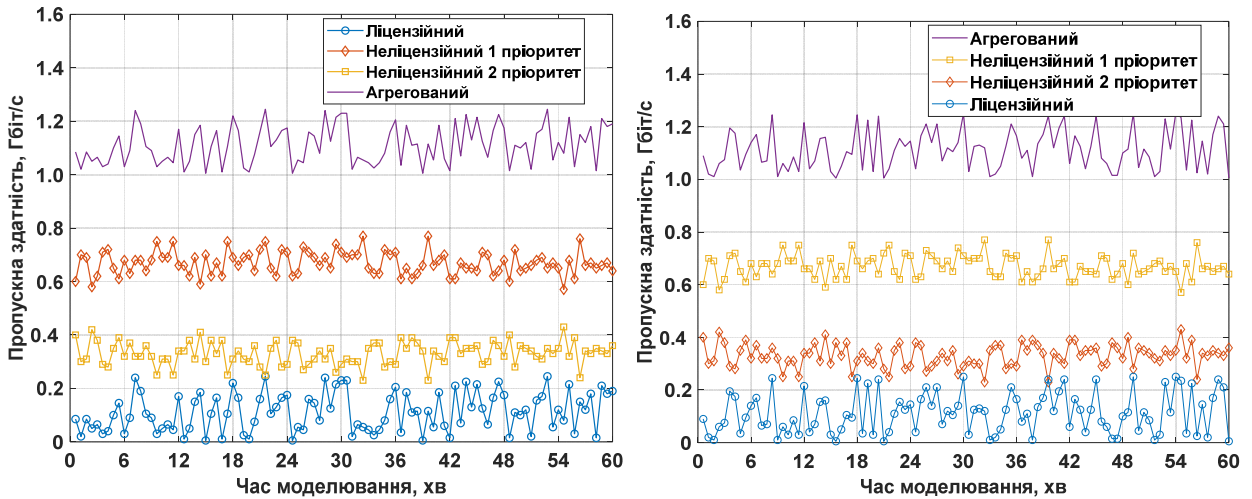
$$C_{total} = \sum_{i1} l_{i1} \log_2(1 + SINR_{i1}) + \sum_{i2} l_{i2} \log_2(1 + SINR_{i2}) + \sum_j p_j \log_2(1 + SINR_j) + \sum_k s_k \log_2(1 + SINR_k),$$

if  $j \neq k$ ,  $\sum_j p_j \log_2(1 + SINR_j) + \sum_k s_k \log_2(1 + SINR_k) = \text{const}$

де  $l_{i1}$  – розподілена смуга частот для першого оператора в ліцензійному спектрі,  $l_{i2}$  – розподілена смуга частот для другого оператора в ліцензійному спектрі.

Для того щоб оцінити ефективність двох операторів мобільного зв'язку, які розділяють неліцензійну смугу, використовуючи найкращий підбір агрегації несучої, ми провели просте моделювання окремих несучих і загальної агрегованої пропускну здатності, що досягається кожним оператором. У нашій моделі ми використовували 100 МГц ліцензійного спектра. Кожен оператор мобільного зв'язку має право на використання 50 МГц в ліцензійному діапазоні. Крім того, ми виділили 100 МГц неліцензійного спектра, який відповідно поділяється на дві смуги по 50 МГц. Кожен оператор використовує свої 50 МГц неліцензійного спектра за допомогою псевдо-ліцензії, а інші 50 МГц – за допомогою когнітивного радіо доступу. У нашій моделі ми припустили, що ліцензований доступ забезпечується за допомогою макросів eNodeB зі спектральною ефективністю 5 біт/Гц. Неліцензований спектр, найімовірніше, буде використовуватися невеликими комірками, а не макро-

комірками, для того, щоб уникнути перешкод. В цьому випадку умови неліцензійних каналів будуть набагато кращі, в порівнянні з тими, що для ліцензованих каналів. Таким чином, ми встановлюємо спектральну ефективність 10 біт/Гц для неліцензійних каналів. Результати моделювання представлені на рис. 3.29 [14].



1. б)

Рис. 3.29. Результати моделювання алгоритму агрегації для двох операторів  
а) – оператор А, б) – оператор В.

Як показано на рис.3.29, продуктивність обох операторів дуже схожа. Це досягається за рахунок особливостей доступу до спектру з найкращим підбором, який запобігає домінування одного оператора серед інших в неліцензійному спектрі, а також дозволяє зменшити перешкоди за допомогою пріоритетного доступу до неліцензійного спектра. На рис. 3.29а і рис. 3.29.б спостерігається, що загальна пропускна здатність двох операторів в неліцензійному спектрі постійна. Це означає, що збільшення пропускної здатності для оператора А означає її зменшення для оператора В в цій самій смузі частот.

Запропонований найкращий відбір агрегації несучих може бути реалізований з SDN на основі CASLUA для досягнення найкращих результатів. Використання комплексного управління спектром дозволяє визначити точні вимоги трафіку в кожній області, наявність спектра в ліцензованій і не

ліцензованих смугах, наявність надійного транзитного з'єднання і т.д. Крім того, шляхом збору даних протягом тривалого часу, можуть бути побудовані деякі моделі трафіку, що дозволяють прогнозувати стан мережі заздалегідь і запобігати мережевим перевантаженням. Крім того, централізоване планування з допомогою SDN дозволяє здійснювати більш складну агрегацію несучих, яка поєднує в собі набагато більше спектрів в смузі частот, в порівнянні зі звичайними нецентралізованими підходами.

Розгортання LTE в неліцензійному спектрі є складним завданням не тільки з точки зору технічних рішень, але і з точки зору економічних питань. Важлива проблема полягає в стимуляції переходу користувачів від технології Wi-Fi до технології неліцензійного LTE. Незважаючи на всі переваги, що LTE-U дає в порівнянні з Wi-Fi, є один недолік фінансової точки. Як правило, провайдер мобільного зв'язку отримує прибуток від користувачів, які платять за обслуговування. Але платити для отримання доступу до неліцензійної групи користувач навряд чи буде, і насправді це не виправдано. Wi-Fi пропонує усі послуги безкоштовно, доведеться лише заплатити певну суму грошей інтернет-провайдеру, який з'єднує Wi-Fi приймач з провідним каналом. Це запобігає міграції з Wi-Fi на LTE, тому що ніхто не хоче платити, якщо є надійні і безкоштовні Wi-Fi точки доступу. Рішення може бути знайдено, якщо провайдери змінять свою модель сервісу від продажу пропускнуої спроможності до продажу послуг. Це дозволить залучити більше користувачів до LTE-U і зменшити кількість користувачів Wi-Fi в малому середовищі, що призведе до значно нижчої інтерференції між LTE і Wi-Fi в неліцензійному спектрі. Звичайно, користувачі не зможуть видалити приватну точку доступу Wi-Fi в домашніх умовах, так як вона використовується для багатьох побутових приладів. Але, в зовнішньому середовищі їх число може бути значно зменшена, при відкритті дороги технології LTE-U.

### **3.7. Висновки до розділу**

Проведено моделювання процесу функціонування гетерогенної мережі в умовах адаптивного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону. Згідно з проведеними дослідженнями, визначено, що удосконалений метод випадкового доступу дає змогу підвищити значення SINR для кінцевих користувачів до 10 разів. В умовах одночасного функціонування мережі LTE та мережі Wi-Fi в цільовій зоні обслуговування. Проведено моделювання гетерогенної мережі в умовах спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону трьома операторами LTE на основі запропонованої ігрової моделі розподілу радіочастотних ресурсів. Як показують результати, запропонована модель дає змогу підвищити ефективність використання радіочастотних ресурсів на 30%, при розподіленому управлінні радіочастотними ресурсами, і на 50% при централізованому управлінні на основі програмно-конфігурованої мережної архітектури.

Для дослідження ефективності функціонування запропонованого методу випадкового доступу з координованим прослуховуванням середовища абонентами LTE на основі технології D2D, проведено моделювання для різних сценаріїв. Моделювання проводилось для 100 абонентів, що є типовим випадком для малих комірок у міському середовищі. Отримані результати показали, що ймовірність колізії між абонентами LTE та Wi-Fi знижується у 3 рази, для випадку груп з двох абонентів, і до 10 разів, для випадку груп з чотирьох абонентів.

## **РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ З ПРОГРАМНИМ УПРАВЛІННЯМ РАДІОЧАСТОТНИМИ РЕСУРСАМИ**

### **4.1. Практичні аспекти впровадження гетерогенних мереж мобільного зв'язку**

Для того, щоб забезпечення стійкості технології радіодоступу на протязі десятиліть, потрібно буде модернізувати стандарти 3GPP та впровадити нові рішення, які зможуть витримати нові виклики. Основні напрямки розвитку направлені на збільшення ємності, щоб забезпечити ефективне функціонування мережі в умовах зростаючого трафіку, енергоефективність, підтримка різних сервісів, додатків та різноманітного трафіку, високий користувацький попит, швидкість передачі даних та транзитне збільшення. В якості потенційного рішення для забезпечення всіх цих вимог, необхідно удосконалити інфраструктуру мікрокомірок, а також методів управління мережею.

Розширенні мікрокомірки можуть бути реалізовані на основі макрокомірок і розташовуватися поодинокі як на відкритій так і на закритій території з ідеальним так і не ідеальним покриттям. Вони також можуть розташовуватися щільно одна до одної або локально саме в тих місцях де густина користувачів велика і макрокомірка не справляється. Мікрокомірки можуть бути вигідними для використання при накладанні їх покриття з покриттям макрокомірок, або без них в певних ситуаціях. Механізми узгодження між макро- та мікрокомірками, а також безпосередньо між мікрокомірками є наразі важливим фактором для розвитку мереж.

В деяких випадках (наприклад БС в приміщеннях або зовні), мікрокомірки можуть розташовуватися поодинокі і покривати малі території для локального поліпшення покриття мережі. В іншому випадку (мегаполіси, великі торгові

центри) їхня кількість значно зростає, вони щільно розташовані одна до одної, для того щоб підтримати велику кількість трафіка на великій території.

Мікро комірка повинна справлятися з різними рівнями смуг для радіочастот макро коміки та мікро комірок. Удосконаленні мікро БС повинні бути пристосовані до всіх теперішніх, а також майбутніх майбутніх діапазонів радіочастот. Акцентуючи увагу на високі частотні діапазони такі як група 5 ГГц, для використання широкосмугових каналів, покращення потрібне і у тих смугах частот, які використовуються локально, для мікро комірок.

З точки зору використання спектру в більш низьких областях частот він стає дефіцитним. Тому сьогодні вкрай важливо забезпечити можливість використання більш високих частотних діапазонів для радіодоступу. Використання більш високих діапазонів частот несе за собою багато складнощів, адже їх тяжче пристосувати до великих територій покриття макро комірок внаслідок або обмеженого простору на стороні користувача, тобто обладнання RF, розміру антени, обмеження покриття (наприклад більше втрат спостерігається на трасі), адже зміна частотного діапазону змусить змінити встановлену мережеву інфраструктуру. Таким образом, оператор використовує більш низькі частотні діапазони які підтримуються макро комірками, для забезпечення покриття території і мобільності користувача, і використовують високі частотні діапазони для мікро комірок для забезпечення високої швидкості передачі даних.

Таке комбіноване використання різних низьких і високих діапазонів частот, забезпечить операторів більш гнучким спектром для побудови мереж. Таким чином, оператори зможуть забезпечити набагато вищу пропускну здатність з використанням місцевих технологій доступу в зонах із широкосмуговими частотними каналами, що дозволить значно зменшити навантаження на існуючі мережі. З точки зору фінансового плану, розмір ринку де використовуватимуться високі частоти має бути достатньо великим. Тому важливо зі сторони оператора, щоб дані частотні діапазони використовували в

тих місцях де є багато користувачів і для максимальної кількості можливих зон. Тобто вони мають використовуватися як і локально так і в приміщеннях.

Сьогодні для встановлення комірки в приміщенні існує багато технічних можливостей, таких як Wi-Fi, фемтокомірки, які використовують системи розподілених антен (DAS). На сьогодні хорошим рішенням є концепція фантомних комірок. За допомогою цього методу проводиться нарощування мережі, що значно покращує можливість мобільності користувачів. Концепція фантомних комірок розподіляє мережу на дві області C та U. Користувачі які знаходяться в області C обслуговуються БС мікрокомірки в діапазоні низьких частот, в той час як макро користувачі областей C та U обслуговуватимуться так само, як і в традиційних мережах. В той самий час користувачі які знаходяться в області U, які обслуговуються мікро БС, працюватимуть з більш високими частотами. Відповідно, вони забезпечують лише передачу спеціального сигналу від користувача, а управління радіо ресурсами, процедуру з'єднання і роз'єднання користувача і фантомної комірки забезпечує макро комірка. Фантомні комірки не використовують конкретні сигнали коміркових ID, синхронізацію, опорні сигнали характерні для звичайних макрокомірок. Вони лише використовують сигнали синхронізації макрокомірок для видимості користувачем.

Важливими технічними рішеннями, які вимагають додаткової уваги є частотний розподіл спектру, ефективне знаходження БС з найкращими параметрами якості обслуговування та мобільність користувача. Щоб забезпечити ефективне знаходження (наприклад, найменш енергозатратне для пристрою користувача), ми пропонуємо використовувати властивості макро – асистента (macro-assisted) у концепції фантомних комірок, також введено певні сигнали виявлення найкращої БС, які передаються за допомогою мікрокомірок синхронізованими за часом з макро сигналами по низхідній лінії зв'язку. За допомогою C- області макро- і мікрокомірки одночасно передаватимуть сигнали виявлення з відносно великим інтервалом передачі (більше 100мс), а

користувач намагатиметься спочатку протягом короткого інтервалу часу знайти сигнали від мікрокомірок. Цей сигнал виявлення має мати такі характеристики, щоб задовільнити вимоги розширення мікро комірок, а саме: стійкість до міжкоміркових інтерференційних перешкод, а також підтримка великого числа кадрів (наприклад, більше 504 доступні значення, які наразі використовує технологія LTE), щоб спростити планування комірок. Крім того, потенційно сигнал може використовуватися для частотної або часової синхронізації і оцінки втрат при передачі сигналу для управління потужністю.

#### **4.2. Багаторівнева архітектура гетерогенної програмно-конфігурованої мережі**

До теперішнього часу було впроваджено багато додаткових технологій для підвищення ефективності, таких як Carrier Aggregation (збирання носіїв), LAA (Licensed Assisted Access – ліцензований допоміжний доступ), SDN і NFV. Як результат, для середньостатистичного користувача 5G доступно багато ступенів свободи з точки зору можливостей підключення та надання послуг. Для управління рівнем 5G необхідні нові рішення для покращення управління мережею, беручи до уваги неоднорідність мережі та різноманітність вимог до послуг [6].

Загальна архітектура запропонованої системи складається з чотирьох площин: RAN (Radio Access Network, площина радіодоступу), площина ядра, площина управління та площина моніторингу. Також представлено систему моніторингу IoT для збору даних з кожного мережевого рівня. Система IoT збирає дані з мережевих одиниць (тобто рівнів) і передає ці дані в поінформований рівень. Ці пристрої можуть бути як користувальним обладнанням (смартфоном, планшетом тощо), так і мережевим обладнанням (базовою станцією, маршрутизатором, контролером SDN тощо). Перелік параметрів для моніторингу не обмежується певними значеннями і може бути



збільшений від оператором мобільної мережі. Для прикладу було обрано найбільш важливі параметри мережі радіодоступу: несучу частоту, використовувану смугу спектру, ідентифікатор комірки, швидкість користувача тощо. Крім того, для метаданих виділено кілька параметрів для упорядкування бази даних у правильному порядку. Ці параметри є міткою часу, широтою, довготою та ін. Архітектура програмного забезпечення мережі 5G з системою моніторингу IoT показана на рис. 4.1 [12].

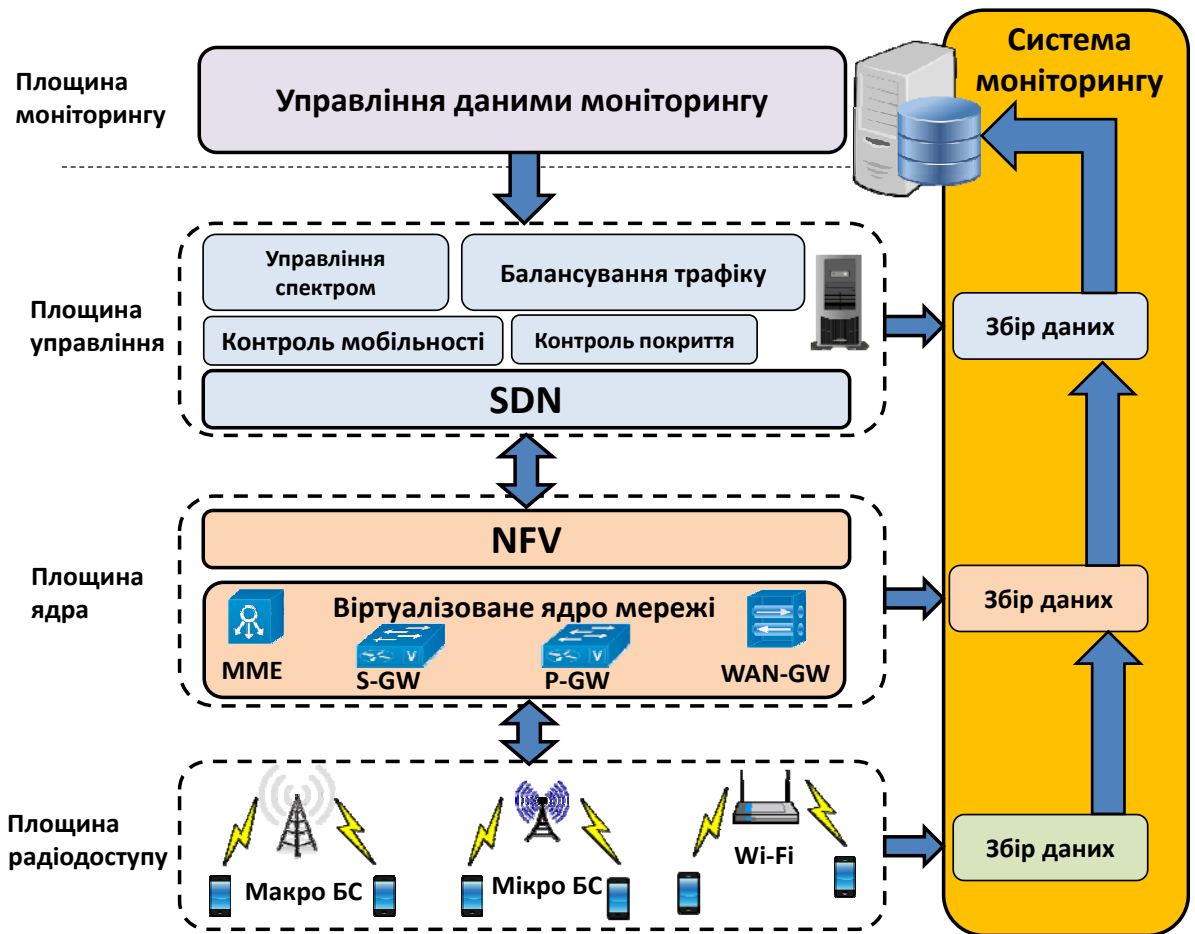


Рис. 4.1. Архітектура гетерогенної мережі мобільного зв'язку з програмним управлінням.

**Площина RAN.** Рівень мережі радіодоступу складається з невеликих клітин і макро-клітин, точок доступу Wi-Fi і D2D (Device-to-Device) з'єднань, RRHs і т.д. Також даний рівень охоплює всю функціональність обробки сигналів, кодування даних, модуляцію та бездротову передачу останньої милі.

Рівень мережі радіодоступу отримує з рівня контролю параметри конфігурації, такі як використовуваний спектр, тип модуляції, розмір комірок та планування передачі.

**Площина ядра.** Рівень ядра подібний до LTE-EPC (Long Term Evolution-Evolved Packet Core – довгостроковий еволюційний пакетний ресурс), але віртуалізований за допомогою NFV. Цей рівень охоплює пакети та сервісні шлюзи, маршрутизатори та об'єкти управління мобільністю та відповідає за агрегацію трафіку з усіх базових станцій, управління мобільністю користувачів, деякі функціональні можливості AAA (Authentication, Authorization and Accounting – автентифікація, авторизація та облік) та доступ до світової мережі.

**Площина управління.** Даний рівень забезпечує мережевий інтелект за допомогою вдосконалених алгоритмів балансування навантаження, спільного використання спектра, розподілу каналів тощо, використовуючи велику кількість даних для контролера SDN задля прийняття ефективних рішень щодо конфігурації мережі та відповідає за застосування інформації про поведінку мережі, щоб забезпечити ефективну конфігурацію мережі. Контролер SDN виконує балансування навантаження, переконфігурацію мережі радіодоступу та перерозподіл спектру для поліпшення продуктивності мережі та задоволення потреб користувачів.

**Площина моніторингу.** Складається з високопродуктивних серверів і баз даних, які використовуються для збирання та розбору даних і обробляє отримані дані за основою теорії бездротового зв'язку.

Запропонована структура моніторингу IoT, зображена на рис. 4.2, спрямована на вдосконалення мережевої інтелектуальної інформації шляхом подання інформації з різними даними про стан мережі в текстовому чи числовому вигляді для зменшення накладних витрат сигнальних даних у порівнянні з традиційними підходами сигналізації LTE (CQI, RSSI, RSRQ тощо) та використовує протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) для збору даних. Система моніторингу розроблена таким чином, що дозволяє

збирати будь-який тип даних у хмарній базі даних, як у текстовій, так і в числовій формі. Ця функція відкриває великі можливості для операторів налаштувати систему моніторингу відповідно до їх вимог у цільовій області розгортання.

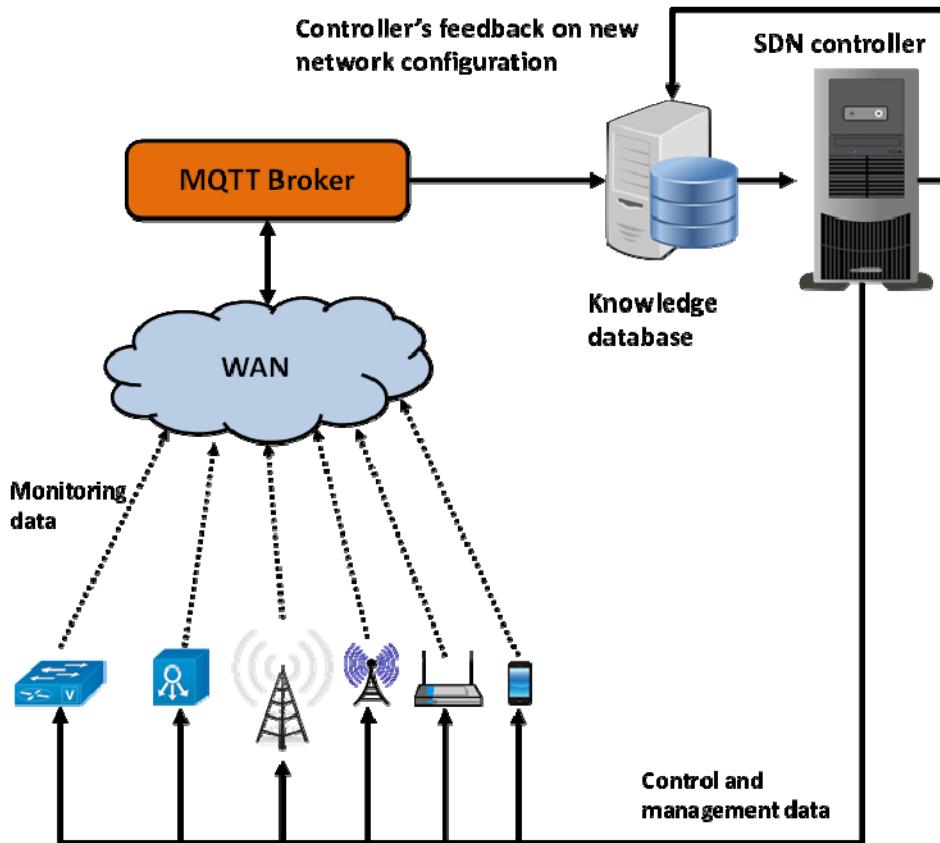


Рис. 4.2. Структура системи моніторингу.

MQTT – це легкий протокол TCP (Transmission Control Protocol – протокол управління передачею), що базується на відкритому протоколі, призначеному для систем IoT. Переваги MQTT полягають у тому, що його легко реалізувати, гарантує доставку даних, агностичну передачу даних, вимагає низькі накладні витрати та працює протягом тривалого періоду сеансу. MQTT складається з трьох основних частин, а саме MQTT джерела, MQTT посередника та MQTT абонента.

У запропонованій системі всі мережеві підрозділи є джерелами MQTT, які надсилають усі отримані дані до посередника MQTT. Дані розділені різними

темами, тобто силою сигналу, частотним діапазоном, використаною послугою та ін. Метадані (мітка часу, широта, довгота) прив'язуються до кожного елемента мережеских даних, щоб забезпечити правильність отриманої інформації. Посередник MQTT пересилає всі дані до абонентів MQTT відповідно до їх підписки. Варто звернути увагу на те, що для зменшення накладних витрат пропонується підписатися лише на необхідні дані, які будуть корисні в процесі створення даних. Запропонована схема підтримує багатьох абонентів MQTT і, таким чином, може використовуватися для багатокористувацьких мереж 5G. Кожен мережеский оператор може підписати необхідні дані в рамках IoT і не повинен створювати власну громіздку систему моніторингу. Ще однією перевагою запропонованої системи моніторингу є невеликий розмір переданих блоків даних (менше 1 Кб) та низькі витрати на трафік. На рис. 4.3 показано експериментальний результат моніторингу сили сигналу від макроелементів та малих клітин за допомогою запропонованої схеми. Експеримент проводився зі 140 користувачами в університетському містечку. Досліджена область покрита макроелементами та дрібними клітинами. Загальна кількість переданих даних складає 4 200 Кб. Розмір переданої одиниці даних для кожного користувача становить 30 байт. Приклад таблиці отриманих даних на сервері показано на рис. 4.4.

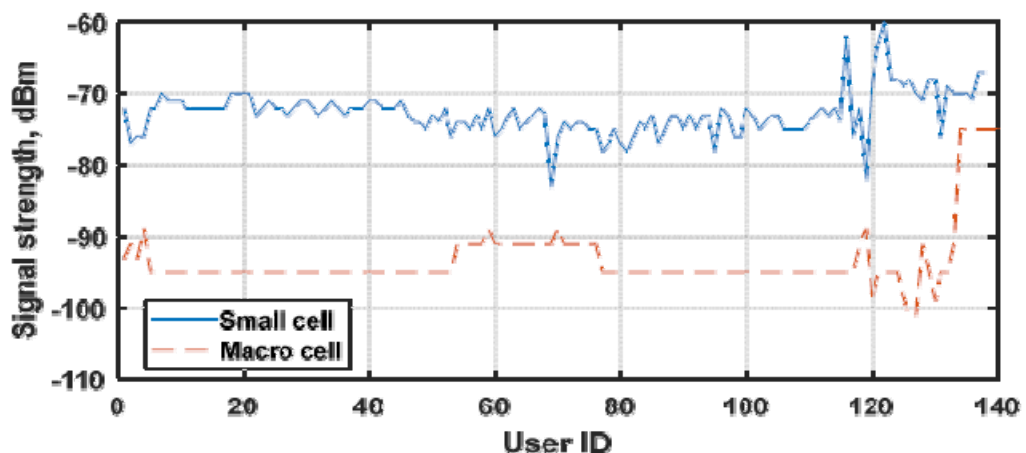


Рис. 4.2. Простий експериментальний приклад результатів вимірювання запропонованої системи моніторингу IoT

Дата і час	Оператор	Мережа МСС	Мережа МНС	Широта	Довгота	Точність позиціонування (м)	Рівень сигналу (дБм)	ASU	RxQual	LTE RSRQ
2017-01-03 09:19:10	SKTelecom	450	05	36.6110904	127.2868834	19.014	-100	40	99	-8
2017-01-03 09:19:00	SKTelecom	450	05	36.6110904	127.2868834	19.014	-94	46	99	-7
2017-01-03 09:18:50	SKTelecom	450	05	36.6110481	127.2867999	19.106	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:18:40	SKTelecom	450	05	36.6110481	127.2867999	19.106	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:18:30	SKTelecom	450	05	36.6110904	127.2868834	19.118	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:18:20	SKTelecom	450	05	36.6110904	127.2868834	19.118	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:18:10	SKTelecom	450	05	36.611297	127.2867163	22.279	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:18:00	SKTelecom	450	05	36.611297	127.2867163	22.279	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:17:50	SKTelecom	450	05	36.6111566	127.2873013	28.12	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:17:40	SKTelecom	450	05	36.6111566	127.2873013	28.12	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:17:30	SKTelecom	450	05	36.6111566	127.2873013	28.12	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:17:20	SKTelecom	450	05	36.6101805	127.2886803	1800	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:17:10	SKTelecom	450	05	36.6113988	127.2876356	19.756	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:17:00	SKTelecom	450	05	36.6113988	127.2876356	19.756	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:16:50	SKTelecom	450	05	36.6114226	127.2879699	20.73	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:16:40	SKTelecom	450	05	36.6114226	127.2879699	20.73	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:16:30	SKTelecom	450	05	36.6114593	127.2897668	50	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:16:20	SKTelecom	450	05	36.6114593	127.2897668	50	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:16:10	SKTelecom	450	05	36.6114593	127.2897668	50	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:16:01	SKTelecom	450	05	36.6116157	127.2886385	19.038	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:15:50	SKTelecom	450	05	36.6116209	127.2892235	21.16	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:15:40	SKTelecom	450	05	36.6116209	127.2892235	21.16	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:15:30	SKTelecom	450	05	36.6114965	127.2892653	19.637	-74	66	99	-7
2017-01-03 09:15:20	SKTelecom	450	05	36.6114965	127.2892653	19.637	-74	66	99	-7
2017-01-03 09:15:10	SKTelecom	450	05	36.6114965	127.2892653	19.637	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:15:00	SKTelecom	450	05	36.6114939	127.2889728	23.691	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:14:50	SKTelecom	450	05	36.6114939	127.2889728	23.691	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:14:28	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-83	57	99	-7
2017-01-03 09:14:20	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:14:00	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:13:21	SKTelecom	450	05	36.6133835	127.2887961	48	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:13:10	SKTelecom	450	05	36.6133835	127.2887961	48	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:13:00	SKTelecom	450	05	36.6131449	127.2886385	29.683	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:12:50	SKTelecom	450	05	36.6131449	127.2886385	29.683	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:12:40	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:12:30	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:10:58	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:10:40	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:10:34	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-74	66	99	-8
2017-01-03 09:10:20	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-74	66	99	-8

Рис. 4.4. Приклад отриманої таблиці статистичних даних в запропонованій системі моніторингу.

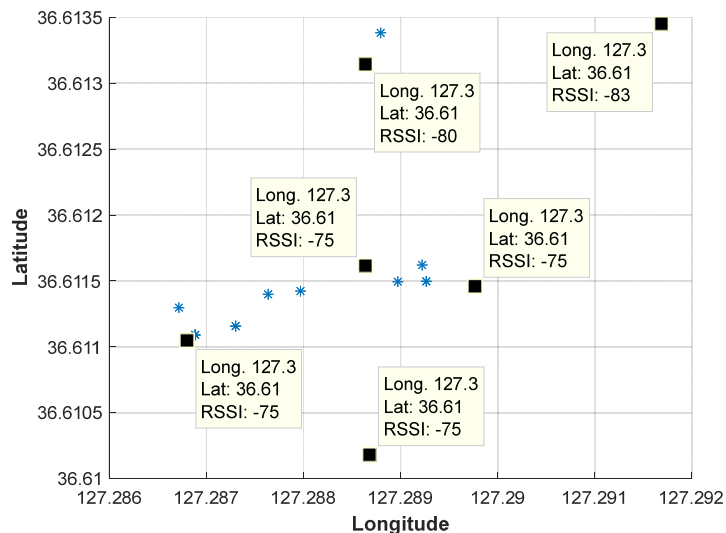


Рис. 4.5. Приклад результатів вимірювання параметрів гетерогенної мережі з прив'язкою до географічних координат

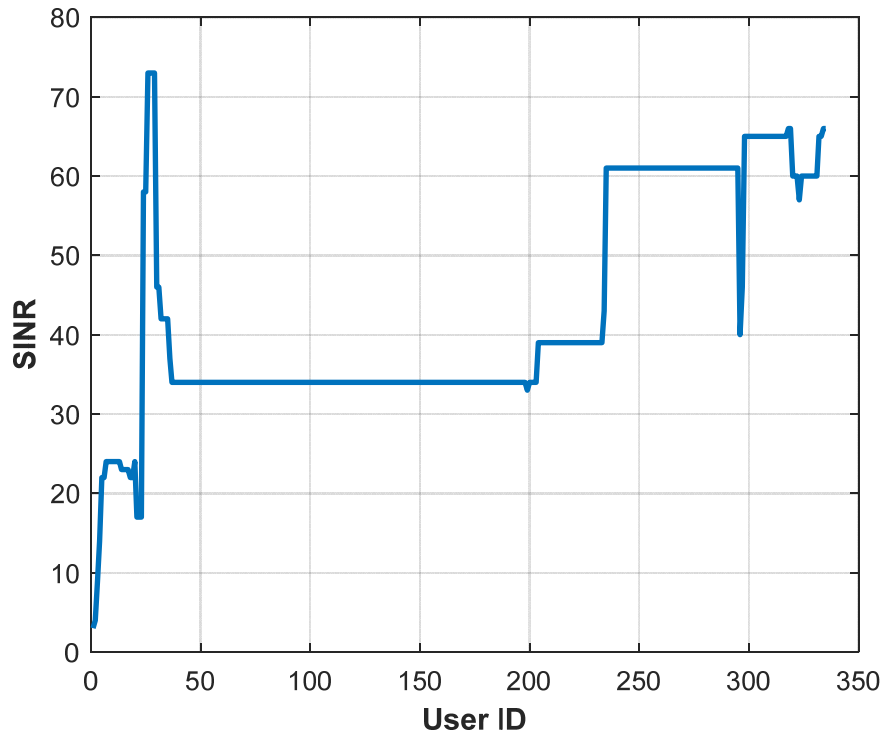


Рис. 4.6. Приклад результатів вимірювання розподілу значень SINR по всіх абонентах мережі

Як показано на рис. 4.2-4.5, навіть дуже низький обсяг даних дозволяє отримувати значну інформацію щодо поточних умов каналу для кожного користувача в досліджуваній області. Поточні мережі підтримують швидкість передачі даних від десятків до сотень Мбіт/с, тоді як 5G, як очікується, забезпечить десятки Гбіт/с. Таким чином, надлишок на передавання даних в запропонованій системі моніторингу буде непомітним для мережі радіодоступу та транспортної мережі. Тим не менш, загальний обсяг даних буде масивним і різноманітним. Тому лінія інформації зможе генерувати дані в поточних умовах мережі та прогнозувати подальші важливі виправлення, які повинен зробити контролер SDN для підтримки необхідної продуктивності мережі. SDN використовує інформацію, щоб розподілити спектр із взаємозв'язком, балансування навантаження між мікрокомірками, мобільність користувачів, тощо.

### **4.3. Управління параметрами гетерогенної мережі на основі технології SDN**

Наведені нижче приклади показують впровадження аналітики великих даних у мобільних стільникових мережах. Основна увага приділяється поліпшенню ефективності мережі та отримання цінної інформації. Область застосування доволі різноманітна: від нинішніх мобільних стільникових мереж до мереж майбутнього 5G. У мобільних стільникових мережах передача голосу та даних супроводжується контрольними повідомленнями, які називаються сигнальними.

Сигналізація працює відповідно до протоколів та забезпечує безпеку, надійність, регулярність та ефективність комунікації. Сигнальний моніторинг відіграє важливу роль при відповідному розподілі мережевих ресурсів, поліпшенні якості мережевих послуг, виявлення мережевих проблем в режимі реального часу тощо. При швидкому розвитку різних мобільних стільникових мереж обсяг даних сигналізації надзвичайно зростає. І традиційні системи моніторингу сигналів мають занадто багато проблем, які потребують вирішення [137-139].

На рис. 4.7 описано моніторинг та аналіз системної архітектури системи сигналізації та аналітику великих даних в гетерогенній мережі мобільного зв'язку. Ця архітектура в основному складається з трьох компонентів: збору даних, аналізу даних та додатків. У збірці даних різні протоколи сигналізації копіюються з декількох мережевих інтерфейсів без переривання звичайних операцій. Далі ці копії збираються та обробляються через процесор протоколу, а потім надсилаються до аналізатора. У аналізаторі дані обробляються за допомогою різних алгоритмів. Результати аналізу можуть бути використані для вирішення завдань ефективного розподілу радіочастотних ресурсів між різними операторами зв'язку та технологіями радіодоступу, такими як 2G, 3G, 4G та 5G.

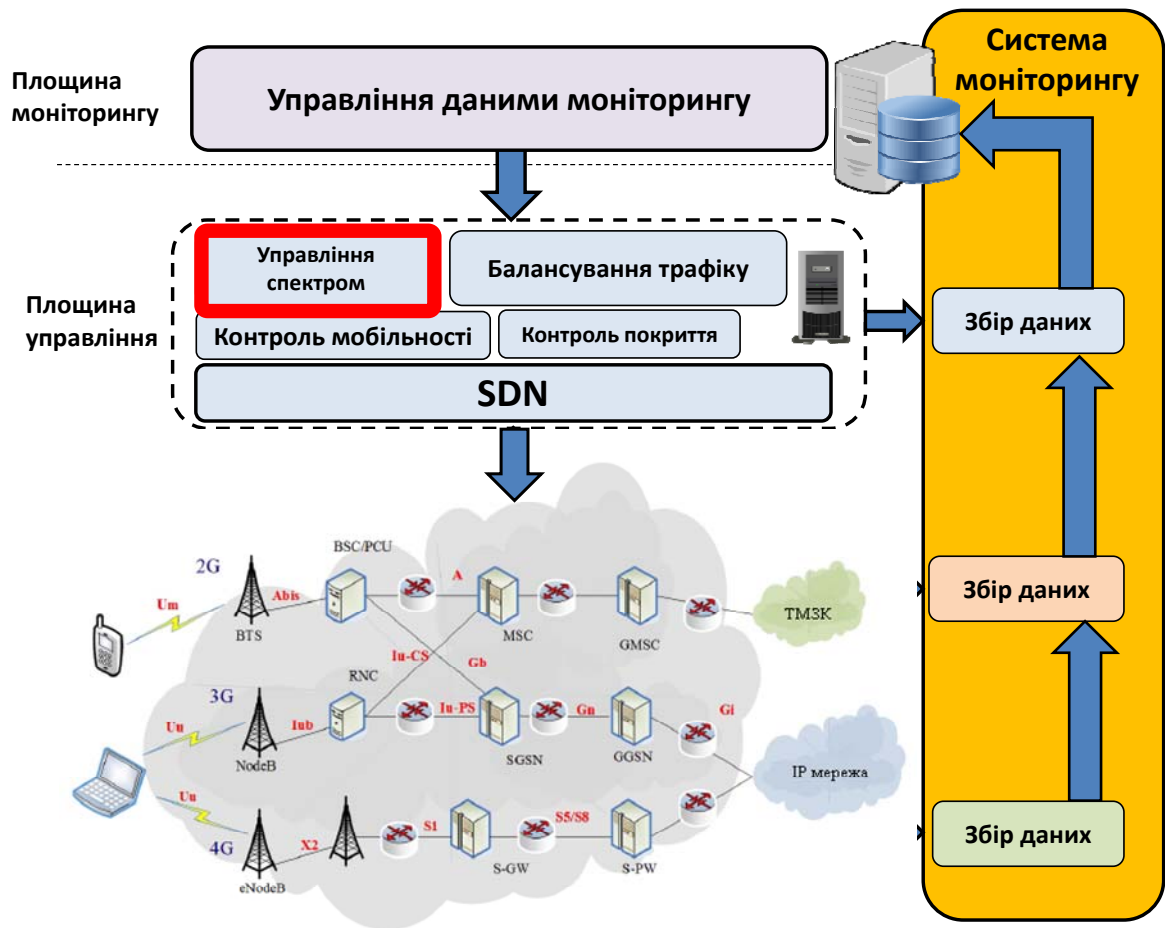


Рис. 4.7. Приклад взаємодії елементів гетерогенної мережної архітектури для вирішення завдань сигналізації та управління спектром.

З широкомасштабним використанням мобільного Інтернету обсяг даних трафіку зростає з карколомною швидкістю. Виконуючи роль носія даних трафіку, оператори стільникового зв'язку повинні правильно керувати мережевим ресурсом, щоб збалансувати навантаження мережі та оптимізувати її використання. Контроль та аналіз трафіку – це елементарна, але важлива частина для управління мережею, що дозволяє проводити аналіз та прогнозування ефективності, виявлення несправностей, управління безпекою тощо [140]. Традиційні підходи до моніторингу та аналізу даних про трафік є простими, але недоцільними в умовах великого трафіку даних [141-145]. На рис. 4.8 показано взаємодію елементів мережної інфраструктури для вирішення завдання балансування трафіку в гетерогенній мережі [10,18].



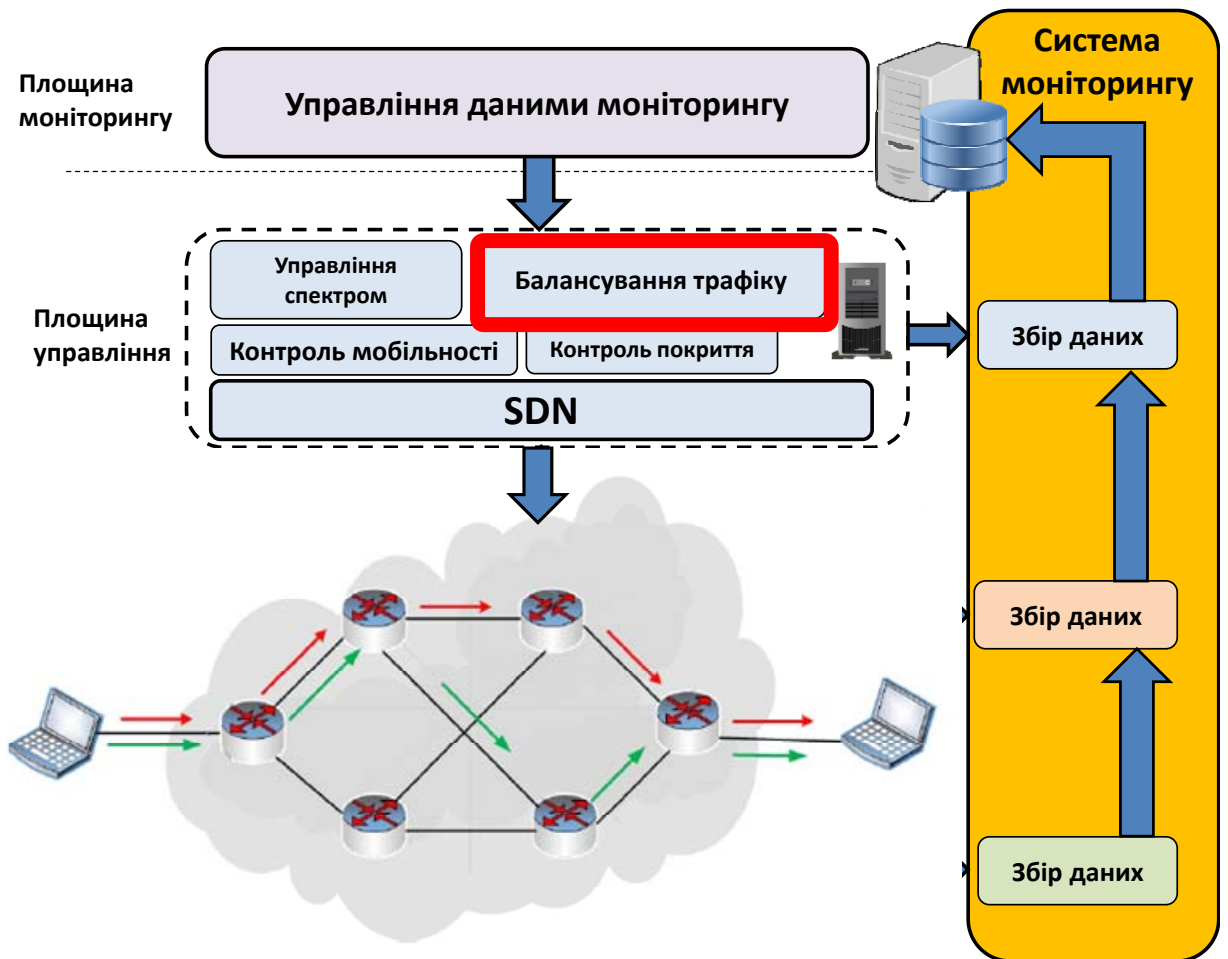


Рис. 4.8. Приклад взаємодії елементів гетерогенної мережної архітектури для вирішення завдання балансування трафіку в гетерогенній мережі.

Діяльність людини пов'язана зі зміною місць перебування, а аналіз даних про місцезнаходження є інформативним. Дані отримані від GPS-датчиків абонентських пристроїв стали важливими стратегічними ресурсами для операторів. Використання геолокаційної інформації з прив'язкою до фізичних параметрів функціонування мережі, дають змогу ефективно приймати рішення стосовно мережного управління [7, 11]. Крім того, інформація про звички та інтереси кінцевих користувачів може бути корисною для прогнозування поведінки абонентів в залежності від їх інтересів (любители спорту, любители музики, тощо) [146-155]. На рис. 4.9 представлено приклад взаємодії елементів гетерогенної мережної архітектури для управління мобільністю абонентів.

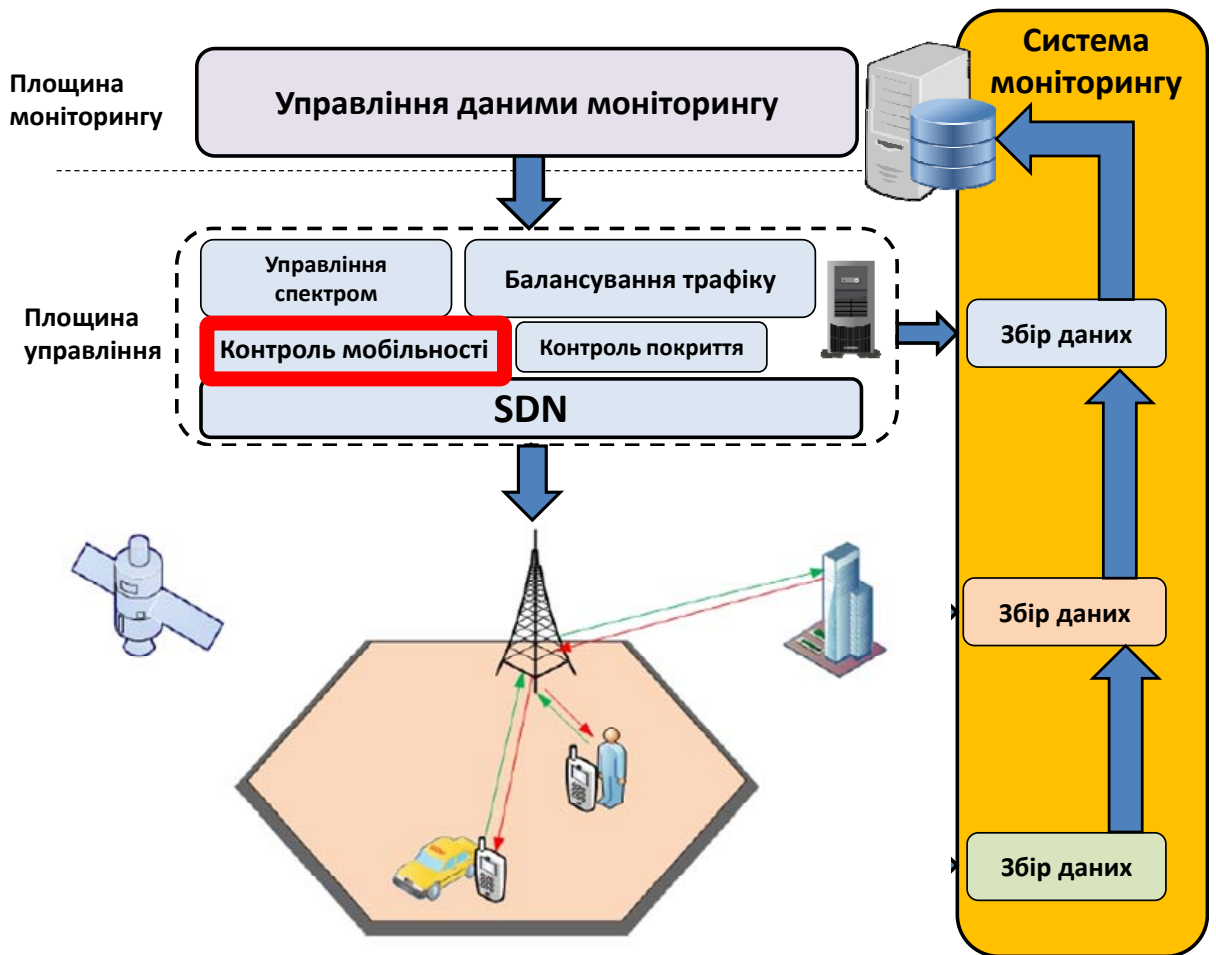


Рис. 4.9. Приклад взаємодії елементів гетерогенної мережної архітектури для управління мобільністю абонентів.

Аналітичні алгоритми застосовується до даних отриманих із системи моніторингу для формування транувальної вибірки та тестової вибірки, на основі яких відбувається навчання системи управління. Одним з найважливіших завдань аналізу великих даних у мобільних стільникових мережах є контроль за якістю покриття в мережі. Запропонована система дає змогу отримувати зворотній зв'язок від абонентів з точки зору рівня якості покриття з прив'язкою до географічних координат, на основі чого оператор матиме змогу внести необхідні корективи у поточну конфігурацію гетерогенної мережної інфраструктури. На рис. 4.10 представлено приклад контролю покриття в гетерогенній мережі на основі SDN.

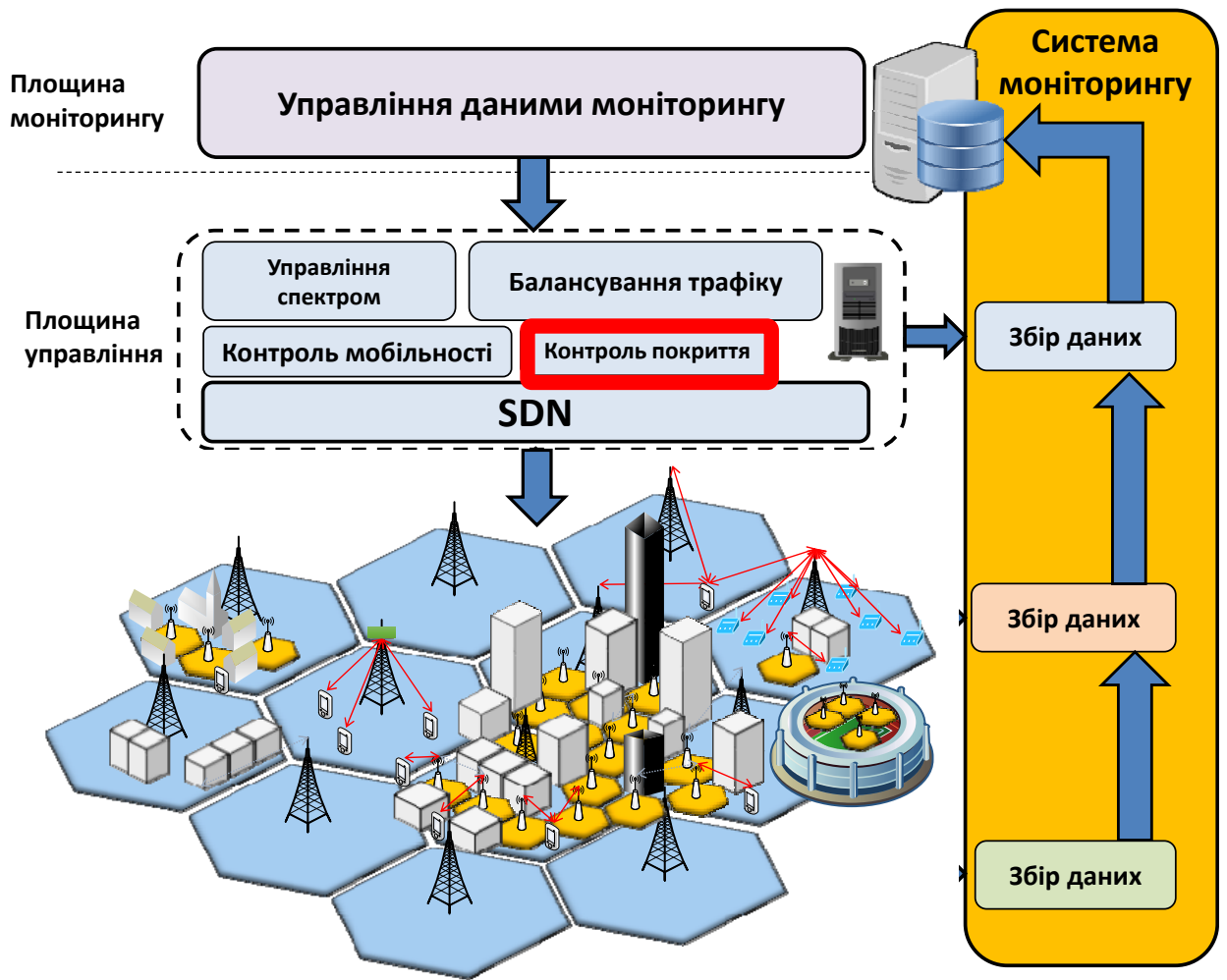


Рис. 4.10. Приклад взаємодії елементів гетерогенної мережної архітектури для контролю за якістю покриття.

На основі отриманої інформації контролер приймає рішення про управління радіочастотними ресурсами у ліцензійному та неліцензійному діапазонах, і передає цю інформацію до відповідних передавальних станцій. Перевага запропонованого рішення полягає в тому, що контролер розподіляє ресурси з урахуванням більшої кількості параметрів, ніж може враховувати кожна базова станція окремо. Іншою перевагою є те, що використання SDN не потребує постійного прослуховування спектру усіма передавальними станціями, оскільки рішення про адаптивний розподіл спектру приймається на стороні SDN контролера. За рахунок використання зворотного зв'язку між передавальними станціями та контролером, дані про поточний стан

використання неліцензійних радіочастотних ресурсів абонентами LTE та Wi-Fi постійно оновлюються в реальному масштабі часу, що дає змогу контролеру здійснювати адаптивне управління гетерогенною мережною інфраструктурою. Таким чином, централізоване управління дає змогу забезпечити ефективне спільне використання радіочастотних ресурсів не лише між різними операторами LTE, але й між різними технологіями радіодоступу. На рис. 4.11 приведено функціональну архітектуру моделі спільного використання радіочастотних ресурсів, яка реалізує запропоновану в другому розділі ігрову модель спільного використання радіочастотних ресурсів операторами зв'язку шляхом централізованого обчислення виразів (2.3)-(2.6) із застосуванням технології SDN [12,14].

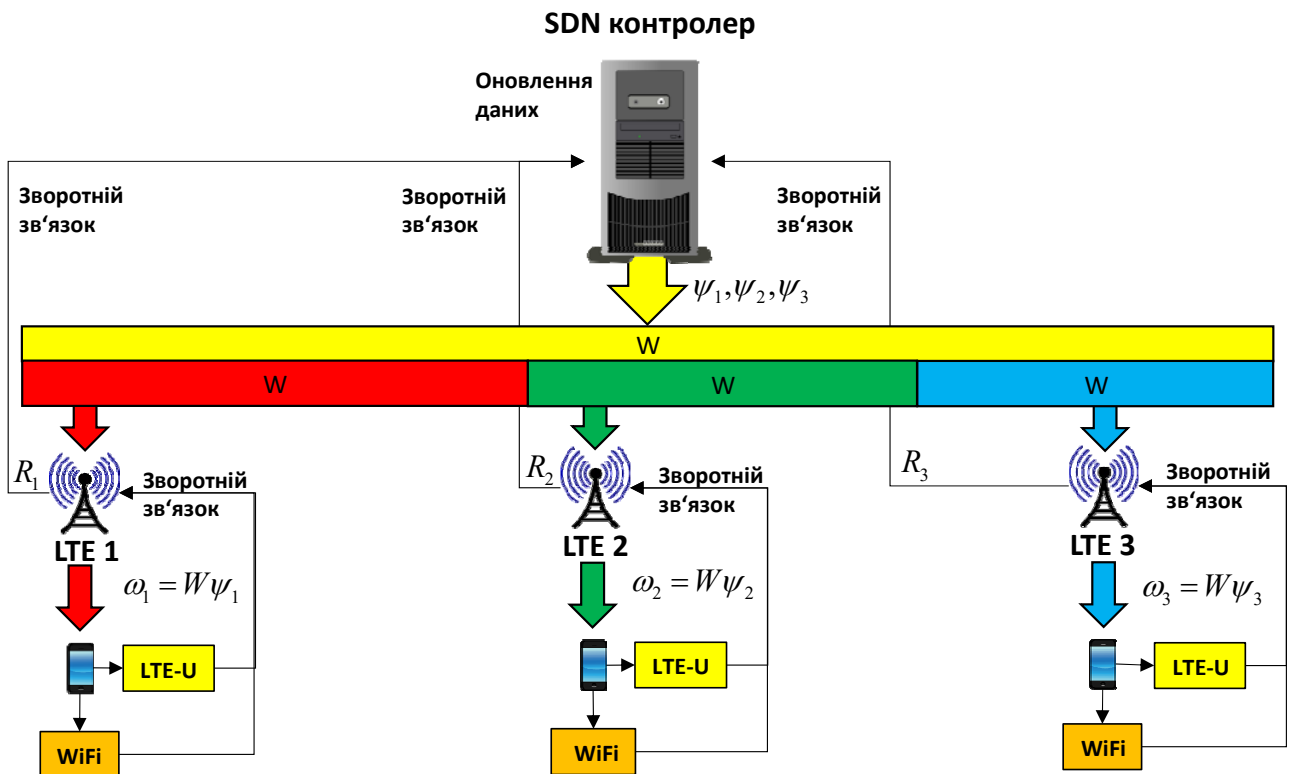


Рис. 4.11. Практична реалізація розробленої моделі спільного використання радіочастотних ресурсів на основі застосування технології SDN.

#### 4.4. Практичні аспекти розгортання LTE в неліцензійному частотному діапазоні

LTE-U не замінить Wi-Fi, так само, як LTE в ліцензованих смугах в даний час не замінює важливість Wi-Fi в якості додаткової стратегії вивантаження для більш розширеного охоплення LTE мережі. З іншого боку, LTE-U не використовуватиметься таким же чином, як LTE в ліцензованому спектрі використовується сьогодні, тому що технологія LTE-U повинна відповідати тій чи іншій мірі певній кількості регулюючих вимог, які існують у всьому світі, і вона буде працювати в загальному спектрі, в якому є певний сформований набір правил.

Для того, щоб зрозуміти і оцінити, як LTE-U буде працювати, важливо в першу чергу зрозуміти, як неліцензійний 5 ГГц спектр використовується сьогодні, і які певні особливості які існують сьогодні в стандарті LTE можуть бути адаптованими для роботи в неліцензійному спектрі.

Wi-Fi використовує TDD (Time Division Multiplexing). Як випливає з назви, TDD це розподіл часу, який використовується для передачі даних від Wi-Fi точки доступу до мобільного клієнта Wi-Fi (тобто, низхідна лінія зв'язку) ортогональна часу, використовуваного для передачі даних з мобільного телефону Wi-Fi клієнта до Wi-Fi точки доступу (тобто, висхідна лінія зв'язку). Частина часу Wi-Fi AP точка доступу «розмовляє» [і мобільний клієнт Wi-Fi «прослуховується»] і частину часу мобільний клієнт Wi-Fi буде «говорити», але клієнти не роблять це водночас. LTE підтримує цю концепцію сьогодні (так званий LTE TDD), він також підтримує FDD (LTE FDD), в якому обслуговувана базова станція (базової станції B в LTE словнику) і мобільні клієнти LTE можуть спілкуватися в той же самий час, але вони використовують різні частотні групи, щоб зробити це. На малюнку 6 графічно зображує основні відмінності між дуплексних схем FDD і TDD.

Для того, щоб працювати поруч з Wi-Fi, LTE-U може містити TDD характер Wi-Fi і план діапазону 5 ГГц. Він може зробити це одним з двох

способів. LTE-U може використовувати схему дуплексу TDD, багато в чому подібну до тої, яку LTE використовує в ліцензованому спектрі. В якості альтернативи, LTE-U може використовувати функцію під назвою Supplemental Downlink, яка також підтримується LTE в ліцензованому спектрі. З Supplemental Downlink, блок спектру використовується для створення шляху низхідній лінії зв'язку, між EnodeB і мобільними пристроями. Аспект в тому, що цей спектр, як правило не має виділеного каналу у висхідній лінії зв'язку. Замість цього, він використовує канал висхідної лінії зв'язку, який пов'язаний з іншою частиною FDD спектра.

Відзначимо, що Supplemental Downlink також може бути використаний в поєднанні з LTE TDD. По суті, Supplemental Downlink дозволяє мати асиметричний розподіл по низхідній лінії зв'язку і канал по висхідній лінії зв'язку по ширині смуги пропускання; наприклад, 20 МГц канал А в низхідній лінії зв'язку і канал 10 МГц в висхідній лінії зв'язку. Supplemental Downlink, яка є по суті такою ж, як LTE Downlink Carrier Aggregation з точки зору реалізації. Кілька операторів по всьому світу вже розгорнули Carrier Aggregation.

Іншу дуже важливе поняття, яке потрібно розуміти це поняття опорних несучих, або первинних несучих та вторинних несучих. LTE-Advanced використовує агрегацію несучих логічно об'єднаних в радіоканалі в двох різних смугах частот або в межах однієї і тієї ж смуги частот. Так наприклад, AT & T використовує 10 МГц спектр в діапазоні 2 (~ 1900 МГц) і 10 МГц спектр в смугі 17 (~ 700 МГц), щоб створити логічний 20 МГц канал низхідної лінії зв'язку для досягнення 150 Мбіт максимальної пропускної здатності. У цьому сценарії розгортання, один з каналів служить в якості основної несучої, а інший канал служить в якості вторинної несучої.

Найбільша відмінність між цими двома несучими є те, що первинна відповідає за зв'язок сигналів сигналізації та інформації управління, а вторинна відповідає в тому числі за систему аутентифікації, управління мобільністю,

доступ, пейджинг, реєстрацію та передавання сигналів та інформації управління.

LTE-U виконує функції вторинної несучої через нестабільність неліцензійного спектру. У LTE-U, первинна несуча завжди знаходиться в ліцензованому спектрі, а вторинна несуча знаходиться в неліцензійному спектрі. У доповненні до сигналів інформації та сигналізації, первинна несуча завжди може бути використана для транспортування мобільного трафіку. З іншого боку, вторинна несуча в неліцензійному спектрі буде більше орієнтована на спільне використання спектру з іншими системами, які використовують неліцензійний спектр, в тому числі Wi-Fi або інші мережі LTE-U. Опора на первинній несучій в ліцензованому спектрі привела до LTE-U який іменується LAA (Licensed Assisted Access).

Як вже говорилося раніше, в доступному для огляду майбутньому LTE-U не буде незалежним від існуючих мереж LTE в ліцензованому спектрі. Замість цього, LTE-U потрібно буде використовувати ліцензований спектр для несучої, оскільки ліцензійний спектр завжди може бути використаний і є більш надійним, ніж неліцензійний спектр. Є ще кілька варіантів розгортання, які можна розглянути, в тому числі окремі можливості для деяких впроваджень LTE-U напередодні ймовірної стандартизації, що відбувається в 3GPP. У LTE-U можна розглядати дві фази підходу до розгортання. Фаза 1 є практично готовою до впровадження в рамках релізу 13 у певних країнах, які не мають жорстких вимог стосовно механізмів прослуховування середовища у діапазоні 5 ГГц. Фаза 2 потребує більш складних алгоритмів, зокрема й тих, які представлені в даній роботі, для того щоб мати право комерційного запуску в країнах, які мають більш суворі нормативні вимоги для діапазону 5 ГГц.

Фаза 1 можлива тому, що вона використовує існуючу технологію LTE Carrier Aggregation і функцію управління ресурсами радіозв'язку, щоб уникнути перешкод з самим собою, навіть не користуючись технічною підтримкою LBT, щоб зробити це. Крім того, будь-який бездротовий додаток або служба може

використовувати цей спектр поряд з Wi-Fi і іншими існуючими пристроями займаючи його до тих пір доки новий учасник підтримуватиме технічні можливості, що дозволяють справедливе використання спектру. Існують три основних механізми, які Фаза 1 використовує, щоб тримати хороший бар'єр між собою і діючими бездротовими додатками, в тому числі і Wi-Fi, не кажучи вже про інших розгортання LTE-U.

Існує до 500 МГц неліцензійного спектра, який доступний і у LTE-U, малі секції можуть працювати тільки з 20 МГц від нього. При скануванні спектра за допомогою спеціального модуля прослуховування LTE-U, у малих секціях можна ідентифікувати ті частоти, які мають найменшу кількість перешкод. У багатьох випадках може бути достатня кількість частот на вибір і не будуть потрібні додаткові механізми ослаблення перешкод це також буде обговорюватись в подальшому. Зауважимо, що 802.11ac підтримує, що найменше 80 МГц канали в 5 ГГц спектрі, коли канали доступні, хоча підтримка 160 МГц каналів є необов'язковою, це може стати більш поширеним в другій хвилі розроблених пристроїв. Очевидно, що коли 802.11ac стане все більш розповсюдженим, і він підтримуватиме більше Wi-Fi трафіку, то відносна «чистота» спектра не буде настільки ж привабливою, як сьогодні.

Якщо неліцензійний спектр буде зайнятий то LTE-U ще може співіснувати в одних і тих же частотах, які використовуються Wi-Fi, якщо він буде робити це співіснування таким чином, щоб не погіршувати продуктивність Wi-Fi. LTE-U підтримує співіснування з Wi-Fi, використовуючи те, що називається Carrier-Sensing Adaptive Transmission (CSAT), це свого роду певний вид адаптивної передачі, щоб аналізувати потоки трафіку в мережі, в тому числі, як часто потоки трафіку зустрічаються. Відповідно до кількості трафіку і моделей трафіку, LTE-U визначає графіки сплеску трафіку протягом тих періодів часу, коли інших трафіків немає. Недолік CSAT є те, що час відгуку складає близько 100мс в той час як LBT вимога приблизно 10 мс.



Слід зазначити, що можна скоротити час затримки CSAT, щоб полегшити передачу чутливого до затримок Wi-Fi трафіку, а трафік LTE завжди можна відправити основною несучою в ліцензійному діапазоні. У будь-якому випадку, здатність LTE використовувати неліцензований спектр (LTE-U) дійсно призводить до трохи непередбачуваних наслідків. Таким чином, LTE-U дійсно здійснює орієнтації трафіку, що передається і спираючись на ліцензований спектр доставляє істотний трафік за короткий час, включаючи сигналізацію і керуючу інформацію.

Оскільки основна, опорна несуча несе відповідальність за передачу інформації сигналізації і каналу управління з використанням ліцензійного спектра, вторинна несуча, яка використовує неліцензійний спектр, не повинна бути активною весь час. Таким чином, всякий раз, коли немає достатньої кількості потоку передачі даних, щоб гарантувати вторинну несучу він може просто припинити передачу даних.

У фазі 1, мала секційна комірka, швидше за все, буде включати в себе LTE в обох ліцензованих і неліцензованих спектрах (LTE-U), так як це технічно простіше мати дві несучі, розташовані в тому ж місці ніж мати ліцензійну частину LTE і LTE-U у географічно різних місцях.

Також ймовірно, що невеликий осередок буде включати підтримку Wi-Fi. Ця думка базується виключно на загальній тенденції, яку спостерігаємо в промисловості коли мова йде про вимоги до невеликої комірki, але розуміємо, що Wi-Fi є більш важливим для деяких операторів, ніж для інших операторів. Наскільки відомо, включаючи Wi-Fi, LTE [ліцензований] і LTE-U в тому ж фізичному полі не складніше, ніж тільки ліцензійну версію LTE і Wi-Fi. Крім того, з точки зору економіки, це має сенс включити Wi-Fi точку доступу, так як це тільки додає скромний приріст витрат.

Маючи первинний носій (ліцензований спектр) і вторинний носій (LTE-U) що розташовані в одному і тому ж місці і є в значній мірі ідентичні, тому сьогодні агрегують несучі. Насправді, агрегація несучих це підхід до реалізації

LTE-U. Єдина відмінність LTE-U є те що він є вторинною несучою і використовує неліцензійний спектр замість однієї з ліцензованих смуг. Інший потенційний варіант це мати первинну несучу (ліцензійний спектр) і вторинну (неліцензійний спектр) сформовані з географічно різних місць.

Наприклад, первинна несуча може виходити від великої відкритої макро – комірки, а неліцензована вторинна несуча може надходити з критої маленької комірки. Дану функцію LTE називають подвійним підключенням, що дозволяє цю можливість із первинною та вторинною несучими у ліцензованому спектрі. LTE-U просто побудувати на цій можливості при використанні неліцензійного спектру для вторинної несучої. Так як подвійний зв'язок є еволюцією несучих, цілком логічно припустити, що вони будуть підтримувати LTE-U.

Хоча ніщо не заважає операторам мобільного зв'язку в більшості регіонів світу – наприклад, Сполучені Штати, Китай і Корея - розгорнути LTE-U сьогодні, вони все ще потребують нових рішень, в тому числі пристроїв, чіпсетів і інфраструктури, яка буде підтримувати його повну сумісність. З огляду на це основним постачальником інфраструктури є Qualcomm, один з перших прихильників LTE-U. Робота з розвитку ведеться шаленими темпами, проте немає ніяких чітких вказівок, коли ці технології будуть доступні. Досі не вирішені проблеми при переміщенні абонента.

Хоча деякі з операторів 3GPP на семінарі в червні минулого року схилились на користь LTE-U але вони залишилися одними з найбільших прихильників Wi-Fi сьогодні, немає ніяких очікувань, що вони будуть відмовлятися від їх Wi-Fi стратегії. Насправді можна стверджувати, що LTE-U створює нові можливості ринку для Wi-Fi, і це також сприяє для подальшого підвищення інноваційних рішень для Wi-Fi, в стандарті 802.11ax і за його межами. Як приклад, оператор без стратегічного інтересу до Wi-Fi може почати розгортання Wi-Fi в своїй мережі при розгортанні LTE-U.

#### **4.5. Висновки до розділу**

Розроблено удосконалену систему управління радіочастотними ресурсами на основі архітектури програмно-керованих мереж. Запропонована система використовує моніторинг параметрів функціонування мережі мобільного зв'язку на основі кінцевих абонентських пристроїв. Це забезпечує зворотній зв'язок між підсистемою радіодоступу та центральним контролером мережі. За рахунок використання зворотного зв'язку між передавальними станціями та контролером, дані про поточний стан використання неліцензійних радіочастотних ресурсів абонентами LTE та Wi-Fi постійно оновлюються в реальному масштабі часу. Така парадигма процесу управління дає змогу оперувати більш повною інформацією про характеристики системи для підтримки прийняття рішень про реконфігурацію параметрів радіоінтерфейсу. Використання централізованого управління радіочастотними ресурсами дозволяє охоплювати більшу кількість комірок при розрахунку ймовірних інтерференційних завад, визначаючи таким чином більш ефективні варіанти розподілу ресурсів. Таким чином, досягається підвищення ефективності використання радіочастотних ресурсів ліцензійного та неліцензійного частотного діапазонів у гетерогенних мережах мобільного зв'язку зі складною комірковою інфраструктурою.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання розроблення моделей та алгоритмів адаптивного використання радіочастотних ресурсів ліцензійного та неліцензійного діапазонів у мережах мобільного зв'язку за наявності кількох конкуруючих операторів зв'язку та високої гетерогенності технологій радіодоступу, типів пристроїв та вимог до параметрів якості передавання даних.

1. Проаналізовано поточний стан та тенденції розвитку мереж мобільного зв'язку у напрямку стандартів п'ятого покоління. Визначено основні обмежуючі фактори для підвищення пропускної здатності мереж мобільного зв'язку, такі як обмеження радіочастотного ресурсу, проблема розподілу спектру та ліцензування технологій радіозв'язку в Україні, відсутність єдиної площини управління гетерогенною мережною інфраструктурою. Здійснено класифікацію потенційних технічних рішень для розширення доступних радіочастотних ресурсів для мереж LTE, зокрема використання неліцензійного частотного діапазону, в якому наразі працює технологія Wi-Fi. Визначено перспективний напрям вдосконалення гетерогенних мереж мобільного зв'язку шляхом гнучкого використання неліцензійних радіочастотних ресурсів, адаптивного розподілу навантаження між вузлами безпроводної мережної інфраструктури, а також нових методів агрегації частотних каналів в ліцензійному та неліцензійному діапазонах. Вирішення поставлених завдань створює фундаментальні засади для подальшої еволюції мереж мобільного зв'язку LTE до технологій 5G та парадигми Інтернету речей.

2. Вирішено задачу адаптивного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону мережами LTE за рахунок удосконалення методу випадкового доступу з прослуховуванням середовища шляхом його адаптації до структури кадру LTE на каналному рівні. На основі удосконаленого методу розроблено алгоритм адаптивного використання неліцензійних частотних каналів абонентами LTE, який знизив рівень інтерференційних завад між

абонентами LTE та Wi-Fi у неліцензійному частотному діапазоні, що дало змогу підвищити співвідношення сигнал/шум для абонентів від 10 до 15 дБ. Це дало змогу підвищити сумарну пропускну здатність гетерогенної мережі мобільного зв'язку за рахунок поєднання ліцензійних та неліцензійних радіочастотних ресурсів.

3. Вирішено задачу спільного використання радіочастотних ресурсів при розгортанні мереж LTE кількома операторами мобільного зв'язку в неліцензійному частотному діапазоні. Для цього запропоновано модель спільного використання радіочастотних ресурсів кількома операторами мобільного зв'язку на основі теорії ігор та ланцюгів Маркова, яка, на відміну від існуючих, прогнозує потреби оператора у пропускній здатності, що дає можливість підвищити ефективність використання ресурсів в умовах одночасного функціонування мереж LTE різних операторів у неліцензійному частотному діапазоні. На основі запропоновано моделі розподілу розроблено алгоритм адаптивної агрегації радіочастот ліцензійного та неліцензійного діапазонів, який використовує логічне розділення радіочастотного ресурсу на три пріоритети доступу оператора, що дає змогу вдвічі підвищити пікову пропускну здатність для абонентів гетерогенної мережі мобільного зв'язку.

4. Запропоновано метод випадкового доступу з координуваним прослуховуванням середовища абонентами LTE. Особливістю запропонованого методу є групування абонентів у D2D кластери, що дає змогу знизити рівень інтерференційних завад у гетерогенній мережі мобільного зв'язку за рахунок зменшення кількості колізій між абонентами LTE у неліцензійному частотному діапазоні. На основі даного методу, розроблено алгоритм адаптивного вибору часового вікна, який використовує ортогональні значення адаптивного часового вікна для окремих D2D груп, що дає змогу знизити кількість колізій до 10 разів.

5. Розроблено удосконалену систему управління радіочастотними ресурсами на основі архітектури програмно-керованих мереж. Запропонована система використовує моніторинг параметрів функціонування мережі

мобільного зв'язку на основі кінцевих абонентських пристроїв. Це забезпечує зворотній зв'язок між підсистемою радіодоступу та центральним контролером мережі. За рахунок використання зворотного зв'язку між передавальними станціями та контролером, дані про поточний стан використання неліцензійних радіочастотних ресурсів абонентами LTE та Wi-Fi постійно оновлюються в реальному масштабі часу. Така парадигма процесу управління дає змогу оперувати більш повною інформацією про характеристики системи для підтримки прийняття рішень про реконфігурацію параметрів радіоінтерфейсу. Використання централізованого управління радіочастотними ресурсами дозволяє охоплювати більшу кількість комірок при розрахунку ймовірних інтерференційних завад, визначаючи таким чином більш ефективні варіанти розподілу ресурсів. Таким чином, досягається підвищення ефективності використання радіочастотних ресурсів ліцензійного та неліцензійного частотного діапазонів у гетерогенних мережах мобільного зв'язку зі складною комірковою інфраструктурою.

6. Проведено моделювання процесу функціонування гетерогенної мережі в умовах адаптивного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону. Згідно з проведеними дослідженнями, визначено, що удосконалений метод випадкового доступу дає змогу підвищити значення SINR для кінцевих користувачів до 10 разів. В умовах одночасного функціонування мережі LTE та мережі Wi-Fi в цільовій зоні обслуговування. Проведено моделювання гетерогенної мережі в умовах спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону трьома операторами LTE на основі запропонованої ігрової моделі розподілу радіочастотних ресурсів з використанням ланцюгів Маркова. Як показують результати, запропонована модель дає змогу підвищити ефективність використання радіочастотних ресурсів на 30%, при розподіленому управлінні радіочастотними ресурсами, і на 50% при централізованому управлінні на основі програмно-конфігурованої мережної архітектури. Для дослідження ефективності функціонування запропонованого методу

випадкового доступу з координованим прослуховуванням середовища абонентами LTE на основі технології D2D, проведено моделювання для різних сценаріїв. Моделювання проводилось для 100 абонентів, що є типовим випадком для малих комірок у міському середовищі. Отримані результати показали, що ймовірність колізії між абонентами LTE та Wi-Fi знижується у 3 рази, для випадку груп з двох абонентів, і до 10 разів, для випадку груп з чотирьох абонентів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. B. Strykhalyuk, Implementation of wireless heterogeneous network based on LTE core virtualization for military communication systems / B. Strykhalyuk, I. Kahalo, M. Brych, M. Beshley, M. Seliuchenko // Системи озброєння і військова техніка– Харків. – 2014. С. 125-132.
2. Б.М. Стрихалюк. Моделювання та тестування системи управління гетерогенної мережі доступу/ Б.М. Стрихалюк, М.І. Бешлей, Г.В. Холявка, М.В. Брич// Телекомунікаційні та інформаційні технології. – Київ. – 2015. - №1. – С. 22–31.
3. Maksymyuk T. Stochastic Geometry Models for 5G Heterogeneous Mobile Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, V. Pelishok // Smart Computing Review, 2015. – Vol. 5. - №2. - P. 89-101.
4. Maksymyuk T. Fractal Modeling for Multi-Tier Heterogeneous Networks with Ultra-High Capacity Demands / T. Maksymyuk, M. Brych, I. Strykhalyuk, M. Jo. // Smart Computing Review, 2015. – Vol. 5. - №4. - P. 346-355.
5. Максимюк Т. А. Оптимізація параметрів гетерогенних мереж мобільного зв'язку на основі фрактальної геометричної моделі / Т.А. Максимюк, М. В. Брич, М. М. Климаш // Наукові записки УНДІЗ. - Київ, 2015. – № 4 (38). - С. 5-16.
6. Demydov I. The Structural-Functional Synthesis of IoT Service Delivery Systems by Performance and Availability Criteria / Ivan Demydov, Yulia Klymash, Mykola Brych, Mykhailo Klymash // Internet of Things (IoT) and Engineering Applications (Canada). – May, 2017. – Vol. 2. – Issue 1. – P. 1-13. (друковане іноземне наукове періодичне видання з напрямку, ISSN 2371-8609).
7. Масюк А. Р. Алгоритм інтелектуального вертикального хендоверу в гетерогенній мобільній мережі на основі хмарних обчислень / А.Р. Масюк, І.Б. Стрихалюк, М. В. Брич, І. О. Кагало, Г. В. Бешлей // Радіоелектроніка та



телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2017. - № 874. - С. 110–121.

8. Максимюк Т. А. Моделі стохастичної геометрії для гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління / Т. А. Максимюк, Р. А. Бурачок, І.Б. Чайковський, М. В. Брич // Комп'ютерні технології друкарства. – Львів, 2015. – № 33. – С. 112-119.

9. Maksymyuk T. Fractal Geometry Based Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, A. Masyuk // Proceedings of international conference IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2015), (Kharkiv, October 13-15, 2015). – Kharkiv, Ukraine, 2015 – P. 69-72.

10. O. Krasko. Flexible backhaul architecture for densely deployed 5G small cells based on OWTDMA network / O. Krasko, M. Brych, A. Masyuk, M. Klymash // Проблеми інфокомунікацій. Наука і технології: Матеріали 3-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 4-6 жовтня 2016 р.). – 2016. – P. 33–35.

11. I. Demydov, Mobility management and vertical handover decision in an always best connected heterogeneous network / I. Demydov, M. Seliuchenko, M. Beshley, M. Brych // 14th International Conference on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), (Lviv-Poljana, Ukraine February 24-27, 2015) – Lviv Polytechnic Publishing House, 2015. – P.103-105

12. T. Maksymyuk. An IoT based monitoring framework for software defined 5G mobile networks/ T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Brych, D. Satria, M. Jo // ACM IMCOM 2017: Proceedings (January 5–7, 2017, Beppu, Japan). – 2017. – P. 105.

13. T. Maksymyuk. Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network/ T.Maksymyuk, M.Brych, M. Klymash, M. Jo // 2nd International Conference on Advanced Information and Communication

Technologies (AICT), (Lviv, Ukraine, July 4-7, 2017) – Lviv Polytechnic Publishing House, 2017. – P.197-200.

14. Maksymyuk T. Game Theoretical Framework for Multi-Operator Spectrum Sharing in 5G Heterogeneous Networks/ T. Maksymyuk, M. Brych, Y. Klymash, M. Kyryk, M. Klymash // Proceedings of international conference IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2017), (Kharkiv, October 10-13, 2017). – Kharkiv, Ukraine, 2017.

15. Максимюк Т. А. Метод синтезу OFDM сигналу на основі вейвлетних функцій / Т. А. Максимюк, С. С. Думич, М. В. Брич // П'ятнадцята відкрита науково-технічна конференція Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки з проблем електроніки та інфокомунікаційних систем, (Львів, 3-6 квітня 2012 р.) - Львів, 2012. - С. 81.

16. Максимюк Т. А. Підвищення спектральної ефективності радіосистем з ортогональним частотним розділенням / Т. А. Максимюк, С. С. Думич, М. В. Брич // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій – 2012», (Київ, 24-27 квітня 2012 р.) - Київ, 2012 – С. 207-209

17. Максимюк Т. А. Підвищення завадостійкості сигнальних конструкцій в системах з ортогональним частотним мультиплексуванням / Т.А. Максимюк, В. О. Пелішок, А. Т. Ратич, М. В. Брич // Матеріали науково-методичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2012», (Львів, 1-4 листопада 2012 р.) – Львів, 2012 – С.41-44

18. Krasko O.V. Dynamic Bandwidth Allocation for 5G Optical Backhaul Networks with Wavelength Division Multiplexing / Krasko O.V., Brych M.V., Al-Anssari A., Qasim N. // International Scientific-Practical Conference «Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication,» Nov. 9-11, 2017, Chernivtsi, Ukraine.

19. Максимюк Т.А. Метод адаптивного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів операторами мереж LTE // Т.А. Максимюк, С.С. Думич, М.В. Брич, О.М. Яремко // Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. - 2018. – Том 29(68). - № 2. - С. 58-63.
20. Damnjanovic A. A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks / A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei et al. // IEEE Wireless Communications – USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011 – vol. 18 – no. 3 – P.10-21.
21. України У. П. Про Стратегію сталого розвитку «Україна–2020 [Електронний ресурс].–Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/5>. – 2015.
22. України Р. К. М. Про схвалення Концепції розвитку телекомунікацій в Україні до 2010 року» від 7 червня 2006 р. за № 316-р //Офіційний вісник України.—2006 р. – №. 23.
23. Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки //Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 2007. – Т. 1. – №. 1. – С. 12.
24. Maksymyuk T. Study and Development of Next-Generation Optical Networks / T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Kaidan, B. Strykhalyuk // Smart Computing Review. - 2014. – Vol. 4. - №6. - pp. 470-480.
25. Insoo N. A Holistic View on Hyper-Dense Heterogeneous and Small Cell Networks / H. Insoo, S. Bongyong, S.S. Soliman // IEEE Communications MagazineUSA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013 – vol. 51 – no. 6. – P.20-27.
26. Klymash M. State of the art and further development of information and communication systems / M. Klymash, O. Lavriv, T. Maksymyuk and M. Beshley // Proceedings of 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), September 11-16, 2016, Kiev - pp.1-6. doi: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739637

27. Jo M. A Survey of Converging Solutions for Heterogeneous Mobile Networks/ M. Jo, T. Maksymyuk, R.L. Batista, T.F. Maciel, A.L.F. de Almeida, M. Klymash // IEEE Wireless Communications, 2014. – vol. 21. - №8. - P. 54-62.
28. Cisco Visual Networking Index (2016) Forecast and Methodology, 2015-2020. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html>.
29. Maksymyuk T. Deployment strategies and standardization perspectives for 5G mobile networks/ T. Maksymyuk, M. Klymash and M. Jo // Proceedings of 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), February 23-26, 2016, Lviv, Ukraine - pp. 953-956. doi: 10.1109/TCSET.2016.7452235.
30. Dumych S. The Virtual Channel Parameters Calculation in All-Optical Network / S. Dumych, T. Maksymyuk, O. Krasko, P. Guskov // Досвід, розробка і застосування САПР в мікроелектроніці: матеріали XII міжнародної конференції CADSM 2013, 19-23 лютого 2013, Поляна, Україна / Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2013. – P. 88.
31. Bhushan N. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G / N. Bhushan, Li Junyi, D. Malladi et al. // IEEE Communications Magazine.– USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014 – vol. 52. - no. 2 – P.82-89.
32. Nakamura T. Trends in small cell enhancements in LTE advanced / T. Nakamura, S. Nagata, A. Benjebbour et al. // IEEE Communications MagazineUSA – Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013 – vol. 51 — no. 2 – P.98-105
33. Hu R.Q. Resource Management for Heterogeneous Networks in LTE Systems: tutorial. / R.Q. Hu, Y. Qian // SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering – USA: Springer, 2014. – 93 p.

34. Jo M. Device-to-Device (D2D) Based Heterogeneous Radio Access Network Architecture for Mobile Cloud Computing / M. Jo, T. Maksymyuk, B. Strykhalyuk, C. Cho // IEEE Wireless Communications, 2015. – Vol. 12. - №3.
35. Peng M. Heterogeneous cloud radio access networks: a new perspective for enhancing spectral and energy efficiencies / M. Peng, Y. Li, J. Jiang, J. Li, C. Wang // IEEE Wireless Communications, 2014 – vol. 21 – no. 6 – pp. 126-135.
36. Максимюк Т. А. Моделі конвергенції гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління на основі технології D2D /Т. А. Максимюк, О. М. Яремко, М. В. Піцик // Телекомунікаційні та інформаційні технології, Київ, ДУТ, 2015. – № 3. - С. 91-102.
37. Sabella D. RAN as a Service: Challenges of designing a flexible RAN architecture in a cloud-based heterogeneous mobile network / D. Sabella, P. Rost, Y. Sheng, E. Pateromichelakis, U. Salim, P. Guitton-Ouhamou and G. Giuliani // In Proc. of IEEE Future Network and Mobile Summit, July 2013 – pp. 1-8.
38. Максимюк Т.А. Дослідження способів підвищення швидкості передавання в нисхідному каналі мобільної мережі LTE / Т.А. Максимюк, М.О. Селюченко // Комп'ютерні технології друкарства. - Львів, 2012. – № 27. - С. 160-169.
39. Klymash M. Smart Backhauling Subsystem for 5G Heterogeneous Network // M. Klymash, P. Huskov, I. Kahalo T. Maksymyuk //IEEE Int. Conf. on “Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” CADSM'2015, (Ukraine, 24-27 February, 2015) – pp. 481-483.
40. Okino K. Pico cell range expansion with interference mitigation toward LTE-Advanced heterogeneous networks / K. Okino, T. Nakayama, , C. Yamazaki, H. Sato, Y. Kusano // In Communications Workshops (ICC), 2011 IEEE International Conference – June, 2011 – P. 1-5
41. Климаш М.М.. Покращення параметрів радіоінтерфейсу LTE/HSOPA / М.М. Климаш, О.А. Лаврів, І.О. Кагало, Б.В. Коваль,

Т.А. Максимюк // Комп'ютерні технології друкарства, Львів, 2011. – № 26. - С. 130-137.

42. Ahmed E. Self-interference cancellation with nonlinear distortion suppression for full-duplex systems / E. Ahmed, A. M. Eltawil, A. Sabharwal // In Signals, Systems and Computers, 2013 IEEE Asilomar Conference – November, 2013 – P. 1199-1203

43. Maksymyuk T..Designing the New Backhaul for 5G Heterogeneous Network Based on Converged Optical Infrastructure /T. Maksymyuk, O.Krasko, M.Kyryk, V. Romanchuk, R. Kolodiy // Acta Electrotechnica et Informatica. – 2017. - Vol. 17. - no. 4 -pp. 9-13.

44. Maksymyuk T. Software Defined Optical Switching for Cloud Computing Transport Systems / T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Jo // ACM IMCOM 2015: Proceedings (January 8–10, 2015, Bali, Indonesia). – 2015. – P. 42.

45. Hong S. K. Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond. / S. K. Hong, J. Brand, J. Choi, M. Jain, J. Mehlman, S. Katti, P. Levis // Communications Magazine IEEE, 2014. – 52(2). – P. 114-121.

46. Dumych S. Simulation of characteristics of optical burst switched networks // S. Dumych, P. Guskov, T. Maksymyuk, M. Klymash / Proceedings of IEEE International conference on “Microwave and Telecommunication Technology” CriMiCo’2013, (Sevastopol, Ukraine, September 8-14, 2013). – pp. 492-493.

47. Ghosh et al. Heterogeneous cellular networks: From theory to practice / Ghosh et al. // IEEE Communications Magazine, 2012 – vol. 50 – no. 6. – P. 54-64.

48. Klymash M. Spectral Efficiency Increasing of Cognitive Radio Networks // M. Klymash, M. Jo, T. Maksymyuk, I. Beliaiev / Proceedings of IEEE International Conference on “Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” CADSM’2013 (Polyana-Svalyava, February 19-23, 2013) – pp. 169-171.

49. Liu C. A novel multi-service small-cell cloud radio access network for mobile backhaul and computing based on radio-over-fiber technologies. / C. Liu, L. Zhang, M. Zhu, J. Wang, L. Cheng, G. K. Chang // *Lightwave Technology Journal*, 2013– 31(17) – P. 2869-2875.
50. Dumych S. Simulation of burst aggregation and signalling schemes for optical burst switched networks // S. Dumych, T. Maksymyuk, P. Guskov / *Proceedings of International conference on “Computer Science & Engineering 2013”*, (Lviv, November, 2013). – pp. 40-41.
51. Akoum S. Data sharing coordination and blind interference alignment for cellular networks. / S. Akoum, C. S. Chen, M. Debbah, R. W Heath // *In Global Communications Conference (GLOBECOM) – 2012, December – P. 4273-4277*
52. Гуськов П. О. Метод динамічного формування структури рівня радіодоступу / П. О. Гуськов, Т. А. Максимюк, М. М. Клиماش// *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації*, Львів, 2015. – № 818. - С. 220-230.
53. Saleh A. RRSEB: A Reliable Routing Scheme For Energy-Balancing Using A Self-Adaptive Method In Wireless Sensor Networks / A. Saleh, B. Ali, H. Mohamad, M. Rasid and A. Ismail // *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2013 – Vol. 7 – No.7 – P.1585-1609.
54. Demestichas P. 5G on the horizon: key challenges for the radio-access network / P. Demestichas, A. Georgakopoulos, D. Karvounas, K. Tsagkaris, V. Stavroulaki, J. Lu and J. Yao // *IEEE Vehicular Technology Magazine* – vol. 8. – no.3. – P. 47-53.
55. Lee I. Improved Resource Allocation Scheme in LTE Femtocell Systems based on Fractional Frequency Reuse / I. Lee, J. Hwang, S. Jang and J. Kim // *KSII Trans. Internet Inform. Syst.*, 2012 – Vol. 6. – no. 9. – P. 2153 – 2169.
56. Maksymyuk T. The LTE channel transmission rate increasing // T. Maksymyuk, V. Pelishok // *IEEE International Conference on “Modern Problems*

of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” TCSET’2012, (Lviv, Ukraine, 21-24 February, 2012) – pp. 251-252.

57. Jo M. Cognitive radio approach for LTE deployment // M. Jo, T. Maksymyuk, M. Kyryk, L. Han // Proceedings of IEEE International Conference on “Perspective Technologies and Methods in MEMS Design” MEMSTECH’2013, (Polyana-Svalyava, Ukraine, April 16–20, 2013) – pp. 63-64.

58. Guskov P. Methods and techniques of spectrum refarming for LTE network deployment/P. Guskov, R. Kozlovskiy, T. Maksymyuk, M. Klymash// IEEE Int. Conf. on Microwave and Telecommunication Technology, Ukraine, pp. 474-475, Sep. 2013.

59. Mitola J. Cognitive radio: making software radios more personal / J. Mitola, G. Q. Maguire // Jr IEEE Personal Communications, 1999 – vol. 6 – no.4 – pp.13-18

60. Kaufman B. Spectrum sharing scheme between cellular users and ad-hoc device-to-device users. / B. Kaufman, J. Lilleberg, B. Aazhang // Wireless Communications, IEEE Transactions, 2013 – 12(3) – P. 1038-1049.

61. TV white spaces – A consultation on white space device requirements// <http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/whitespaces/summary/condoc.pdf>.

62. Stryhalyuk B. Performance increasing method of wireless system based on determining time-frequency localization properties of OFDM signal / B.Stryhalyuk, O.Yaremko, T.Maksymyuk, O.Melnyk // ECONTECHMOD: an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes, Krakow, 2012. – vol. 1, №3, P. 49-54.

63. Lin X. Spectrum sharing for device-to-device communication in cellular networks/ Lin X., Andrews J. G., Ghosh A. // IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014 – 13(12) – P. 6727-6740.

64. Mueck M. Novel Spectrum Usage Paradigms for 5G / M. Mueck, W. Jiang, J. Sung // White Paper — USA: IEEE TCCN SIG CR in 5G, 2014. — 77 p.



65. Maksymyuk T. Comprehensive Spectrum Management for Heterogeneous Networks in LTE-U / T. Maksymyuk, M. Kyryk and M. Jo // IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 6, pp. 8-15, December 2016. doi: 10.1109/MWC.2016.1600042WC.
66. Ratasuk R. LTE in unlicensed spectrum using licensed-assisted access / N. Mangalvedhe, A. Ghosh // In Globecom Workshops IEEE – December, 2014 – P. 746-751
67. Parkvall S. Evolution of LTE toward IMT-advanced / S. Parkvall, A. Furuskär, E. Dahlman // Communications Magazine, IEEE, 2011 – 49(2) – P. 84-91.
68. Bhosale R. D. Performance Evaluation of Unlicensed Mobile Access Using WiFi. / R. D. Bhosale, A. R. Nigavekar // Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), 2015 International Conference IEEE – 2015, February – P. 148-152.
69. Jailton J. A quality of experience handover architecture for heterogeneous mobile wireless multimedia networks / J. Jailton, T. Carvalho, W. Valente, C. Natalino, R. Frances, K. Dias // IEEE Communications Magazine, Jun., 2013 – vol. 51 – no. 6 – P. 152-159
70. Zhang H. Coexistence of Wi-Fi and heterogeneous small cell networks sharing unlicensed spectrum. H. Zhang, X. Chu, W. Guo, S Wan // Communications Magazine, IEEE, 2015 – 53(3) – P.158-164
71. Khan F. Millimeter-wave mobile broadband with large scale spatial processing for 5G mobile communication / F. Khan, Z. Pi, S. Rajagopal // In IEEE 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), Oct. 2012 – P. 1517-1523
72. Haykin S. Cognitive radio: Brain empowered wireless communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications – 2(23) – P. 201–220.
73. Mitola J. Cognitive radio –An integrated agent architecture for software defined radio // Ph.D. thesis – Royal Institute of Technology (KTH): Sweden – 2000.

74. Fekade B. A Virtual Server QoS Enhancement Method in Cloud Computing / B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Jo // ACM 10th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (ACM IMCOM'2016), Jan. 4-6, 2016, Danang, Vietnam, Article #81.
75. J. Gubbia, R. Buyyab, S. Marusic, M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," Future Generation Computer Systems, no.29, pp. 1645-1660, 2013.
76. Klymash M. Improving architecture of LTE mobile network for IoT services provisioning/ M. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko, T. Maksymyuk// IEEE Int. Conf. on Advanced Information and Communication Technologies, Ukraine, pp. 209-212, July, 2017.
77. Fekade B. Clustering hypervisors to minimize failures in mobile cloud computing / B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Jo // Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 16, no. 18, pp. 3455-3465, 2016.
78. Weiss T. A. Spectrum pooling: An innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency / T. A. Weiss and F. K. Jondral // IEEE Commun. Mag, radio Communications Supplement, Mar. 2004 – vol. 42 – no. 3 – pp. S8–S14.
79. Zheng K. et al. Big data-driven optimization for mobile networks toward 5G //IEEE network. – 2016. – T. 30. – №. 1. – C. 44-51.
80. C-RAN: The Road Towards Green RAN – White Paper, ver. 3.0 — China: China Mobile Research Institute, Oct. 2011. — 91 p.
81. Chen K. C-RAN: The Road Towards Green RAN / K. Chen, R. Duan // China Mobile Research Institute, white paper, v. 2.5, Oct., 2011.
82. Stuber G. L. Interference analysis of TV-band whitespace/ Stuber G. L., Almalfouh S. M., Sale D. //Proceedings of the IEEE, 2009 – 97(4) – P. 741-754.
83. White space devices (WSD); wireless access systems operating in the 470 MHz to 790 MHz frequency band; harmonized EN covering the essential

requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive //Standard Draft ETSI EN 301 598 V1.0.0.

84. FCC. Third memorandum opinion and order, 2012// [http://transition.fcc.gov/Daily\\_Releases/Daily\\_Business/2012/db0405/FCC-12-36A1.pdf](http://transition.fcc.gov/Daily_Releases/Daily_Business/2012/db0405/FCC-12-36A1.pdf).

85. Yu Y. Performance analysis of soft frequency reuse for inter-cell interference coordination in LTE networks / Y. Yu, E. Dutkiewicz, X. Huang, M. Mueck, G. Fang // IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), Tokyo, Japan, October, 2010 – P. 504-509.

86. Cierny M. On number of almost blank subframes in heterogeneous cellular networks / Cierny M., Wang H., Wichman R., Ding Z., Wijting C.// IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013 – 12(10) – P. 5061-5073.

87. Khan J. Cellular Handover approaches in 2.5 G to 5G Technology/ Khan J., Abbas A., Khan K.// International Journal of Computer Applications, 2011 – 21(2) – P. 28-37.

88. Tavares F. M. Interference-Robust Air Interface for 5G Ultra-dense Small Cells// Tavares F. M., Berardinelli G., Mahmood N. H., Catania D., Sørensen T. B., Mogensen P.// Journal of Signal Processing Systems, 2015 –P. 1-14.

89. Lea A. Spectrum options for wireless backhaul of small cells/ Lea A., Negus K., Tapse H., Varadarajan B., Vaughan R.// IEEE 8th European Conference on Antennas and Propagation, Apr.2014 – P. 3310-3311.

90. Osa V. Implementing opportunistic spectrum access in LTE-advanced”, / V. Osa, C. Herranz, J. F. Monserrat and X. Gelabert // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012 – no.1 – pp. 1-17.

91. ElSawy H. HetNets with cognitive small cells: user offloading and distributed channel access techniques/ ElSawy H. , Hossain E., Kim D. I.// IEEE Communications Magazine, 2013 –51(6) – P. 28-36.

92. Jo M. Massive MIMO: Survey and Future Research Topics/ M. Jo, D. Araújo, T. Maksymyuk, A.L.F. de Almeida, T. F. Maciel, J. Mota // IET Communications, vol. 10, no.5, 2016, pp. 1938-1946.
93. Hur S. Millimeter wave beamforming for wireless backhaul and access in small cell networks/ Hur S., Kim T., Love D. J., Krogmeier J. V., Thomas T., Ghosh A. // IEEE Transactions on Communications, 2013 – 61(10), P. 4391-4403.
94. Z. Shen et al., “Overview of 3GPP LTE-advanced carrier aggregation for 4G wireless communications,” IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 2, 2012.
95. 3GPP TR 36.889 V13.0.0, “3rd Generation Partnership Project; Technical specification group radio access network; study on licensed-assisted access to unlicensed spectrum” (Rel. 13), 2015.
96. “LTE in unlicensed spectrum,” 3GPP, [http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1603-lte\\_in\\_unlicensed](http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1603-lte_in_unlicensed). Retrieved November 5, 2015.
97. Google Inc., “LTE and WiFi in Unlicensed Spectrum: A Coexistence Study,” White paper, June 2015
98. “U-LTE: Unlicensed Spectrum Utilization of LTE,” HUAWEI, [www.huawei.com/ilink/en/download/HW\\_327803](http://www.huawei.com/ilink/en/download/HW_327803). Retrieved November 5, 2015.
99. Cristina Cano, Douglas J. Leith, “Coexistence of WiFi and LTE in Unlicensed Bands: A Proportional Fair Allocation Scheme,” IEEE International Conference on Communications Workshop (ICCW), June 2015
100. “Extending LTE Advanced to unlicensed spectrum,” Qualcomm, [www.qualcomm.com/solutions/wireless-networks/technologies/lteunlicensed](http://www.qualcomm.com/solutions/wireless-networks/technologies/lteunlicensed). Retrieved November 5, 2015
101. Y. Jian et al. “Coexistence of Wi-Fi and LAA-LTE: Experimental evaluation, analysis and insights,” IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW’2015), pp. 2325-2331, 2015.
102. A. Mukherjee etc., “System architecture and coexistence evaluation of licensed assisted access. LTE with IEEE 802.11,” IEEE International Conference on Communications Workshop (ICCW), June 2015

103. Jeongho Jeon, Huaning Niu, Qian Liy, Apostolos Papathanassiou and Geng Wu, "LTE with Listen-Before-Talk in Unlicensed Spectrum," IEEE International Conference on Communications Workshop (ICCW), June 2015
104. O. Sallent, J. Prez-Romero, R. Ferrs and R. Agust, "Learning-based Coexistence for LTE Operation in Unlicensed Bands," IEEE International Conference on Communications Workshop (ICCW), June 2015
105. R. Ratasuk, M.A. Uusitalo, N. Mangalvedhe, A. Sorri, S. Iraj, C. Wijting, and A. Ghosh, "License-exempt LTE deployment in heterogeneous network," in Wireless Communication Systems (ISWCS), 2012 International Symposium on, Aug 2012, pp. 246250.
106. S. Dimatteo, H. Pan, B. Han and V.O.K. Li, "Cellular traffic offloading through WiFi networks," in IEEE 8th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS), pp.192-201, Oct. 2011.
107. Baoan Jia and Meixia Tao, "A Channel Sensing Based Design for LTE in Unlicensed Bands," IEEE International Conference on Communications Workshop (ICCW), June 2015
108. "LTE in Unlicensed Spectrum: Harmonious Coexistence with WiFi," <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/lte-unlicensedcoexistence-whitepaper.pdf>.
109. Abinader, F.M., et al., "Enabling the coexistence of LTE and WiFi in unlicensed bands," IEEE Communications Magazine, 2014, Vol. 52, pp. 54-61.
110. Z. Ning, M. Saisai, X. Jing, Z. Bin, and Z. Wei, "Unlicensed Spectrum Usage Method for Cellular Communication Systems," International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2012
111. R. Etkin et al., "Spectrum sharing for unlicensed bands," IEEE JSAC, vol. 25, no. 3, pp. 517-528, 2007.
112. F. Teng, D. Guo and M. L. Honig, "Sharing of unlicensed spectrum by strategic operators," IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP'2014), pp. 288-292.

113. A. M. Cavalcante, E. Almeida, R. . Vieira, F. Chaves, R. C. Paiva, F. Abinader, S. Choudhury, E. Tuomaala, and K. Doppler, "Performance evaluation of LTE and Wi-Fi coexistence in unlicensed bands," IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring'2013), pp. 1-6, June, 2013.
114. Gandalf. Monitoring and self-tuning of RRM parameters in a multisystem network . <http://www.celtic-initiative.org/>;
115. SOCRATES. Self-Optimisation and self-ConfiguRATion in wirelEss networkS. <http://www.fp7-socrates.org/>;
116. SEMAFOUR. Self-Management for Unified Heterogeneous Radio Access Networks . <http://fp7-semafour.eu/>;
117. SESAME. Small Cells Coordination for Multi-tenancy and Edge services. <https://5g-ppp.eu/sesame/> ;
118. SELFNET. Framework for self-organised network management in virtualised and software defined networks. <http://www.cognet.5g-ppp.eu/cognet-in-5gpp/>
119. Zheng K. et al. Big data-driven optimization for mobile networks toward 5G //IEEE network. – 2016. – T. 30. – №. 1. – C. 44-51.
120. Su Z., Xu Q., Qi Q. Big data in mobile social networks: a QoE-oriented framework //IEEE Network. – 2016. – T. 30. – №. 1. – C. 52-57.
121. Trivisonno R. et al. SDN-based 5G mobile networks: architecture, functions, procedures and backward compatibility //Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. – 2015. – T. 26. – №. 1. – C. 82-92.
122. Sun S. et al. Integrating network function virtualization with SDR and SDN for 4G/5G networks //IEEE Network. – 2015. – T. 29. – №. 3. – C. 54-59.
123. Aissioui A. et al. Toward Elastic Distributed SDN/NFV Controller for 5G Mobile Cloud Management Systems //IEEE Access. – 2015. – T. 3. – C. 2055-2064.
124. A. McAfee and E. Brynjolfsson, «Big data: The management revolution», Harvard Bus. Rev., vol. 90, no. 10, pp. 61\_67, 2012.

125. S. Bi, R. Zhang, Z. Ding, and S. Cui, «Wireless communications in the era of big data», IEEE Commun. Mag., vol. 53, no. 10, pp. 190\_199, Oct. 2015.
126. J. Liu, F. Liu, and N. Ansari, «Monitoring and analyzing big traffic data of a large-scale cellular network with Hadoop», IEEE Netw., vol. 28, no. 4, pp. 32–39, Jul. 2014.
127. Akyildiz I. F., Lin S. C., Wang P. Wireless software-defined networks (W-SDNs) and network function virtualization (NFV) for 5G cellular systems: An overview and qualitative evaluation //Computer Networks. – 2015. – T. 93. – C. 66-79.
128. "LTE Medium Access Control (MAC) protocol specification - 3GPP TS 36.321 version 12.5.0 Release 12," 3GPP, [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136300\\_136399/136321/12.05.00\\_60/ts\\_136321v120500p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136321/12.05.00_60/ts_136321v120500p.pdf). Retrieved November 5, 2015.
129. "Scheduling in LTE," Adaptive Signal Processing and Information Theory Research Group, <http://www.ece.drexel.edu/walsh/Gwanmo042712.pdf>. Retrieved November 5, 2015.
130. P. Rajmic et al. "Simplified Probabilistic Modelling and Analysis of Enhanced Distributed Coordination Access in IEEE 802.11," The Computer Journal, vol. 58, no.6, pp. 1456-1468, 2015.
131. A. Shorrocks, "Decomposition procedures for distributional analysis: a unified framework based on the Shapley value," Journal of Economic Inequality, pp. 1-28., 2013.
132. 3GPP TS 36.104 version 12.1.0, " EUTRA; Base Station Radio Transmission and Reception."
133. 3GPP TR 25.813 Evolved Universal Terrestrial Radio Access and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), Release 7, V7.1.0, 2006.
134. Catania D. The Potential of Flexible UL/DL Slot Assignment in 5G Systems / Catania D., Sarret M. G., Cattoni A. F., Frederiksen F., Berardinelli G.,

Mogensen P. // IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), Sep.2014 – P. 1-6.

135. Kelly, Vivian. "New IEEE 802.11ac Specification Driven by Evolving Market Need for Higher, Multi-User Throughput in Wireless LANs," IEEE. [https://standards.ieee.org/news/2014/ieee\\_802\\_11ac\\_ballot.html](https://standards.ieee.org/news/2014/ieee_802_11ac_ballot.html). Retrieved November 5, 2015.

136. "802.11-2012 - IEEE Standard for Information technology," IEEE Standards Association, <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11-2012.html>. Retrieved November 5, 2015.

137. Cao J. Seamless Roaming over Heterogeneous Wireless Networks / J. Cao and C. Zhang // In Seamless and Secure Communications over Heterogeneous Wireless Networks, Springer New York, 2014 – pp. 27-62.

138. Liang J. An Energy-Efficient Sleep Scheduling With QoS Consideration in 3GPP LTE-Advanced Networks for Internet of Things / J. Liang, J. Chen, H. Cheng and Y. Tseng // IEEE J. Emerg. Sel. Topics Circuits Systems, 2013 – Vol.3 – No.1 – P.13-22.

139. Han B. Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations/ Han B.// IEEE Comm., vol. 53. no.2, pp. 90-97.

140. Gudipati A. SoftRAN: Software defined radio access network / A. Gudipati, D. Perry, L. E. Li and S. Katti // In Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking, August 2013 – pp. 25-30.

141. Z. Smoreda, A. M. Olteanu Raimond, and T. Couronné, «Spatio-temporal data from mobile phones for personal mobility assessment», in Transport Survey Methods: Best Practice for Decision Making. Bingley, U.K.: Emerald Group, Nov. 2013, pp. 745–766.

142. Fekade B. Probabilistic Recovery of Incomplete Sensed Data in IoT/ B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo//IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, 2017.



143. Maksymyuk T. Increasing of energy efficiency of a cognitive radio network/ T. Maksymyuk, M. Klymash, M. Jo// IEEE Int. Conf. on Microwave and Telecommunication Technology, Ukraine, pp. 277-278, Sep. 2013.
144. Yaremko O. The optimal power control method in multiuser cellular networks / O. Yaremko, B. Stryhalyuk, T. Maksymyuk, O. Lavriv, D. Kozhurov // An International Quarterly Journal on Economics in Technology, New Technologies and Modelling Processes. Vol. 2, No 1. Lublin – Cracow – 2013. P. 63-67.
145. E. Oh, K. Son, and B. Krishnamachari, “Dynamic Base Station Switching-On/Off Strategies for Green Cellular Networks,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 12, no. 5, pp. 2126–2136, May 2013.
146. Lopez-Perez D. Mobility management challenges in 3GPP heterogeneous networks/ Lopez-Perez D., Güvenc İ., Chu X. // IEEE Communications Magazine, 2012 – 50(12), P. 70-78.
147. Guidolin F. Context-aware handover in HetNets. / Guidolin F., Pappalardo I., Zanella A., Zorzi M. // IEEE European Conference on Networks and Communications (EuCNC), June , 2014– P. 1-5.
148. 145X. Zhou et al., «Human mobility patterns in cellular networks», IEEE Commun. Lett., vol. 17, no. 10, pp. 1877–1880, Oct. 2013.
149. C. Song, T. Koren, P. Wang, and A. L. Barabási, «Modelling the scaling properties of human mobility», Nature Phys., vol. 6, no. 10, pp. 818–823, Sep. 2010.
150. T. Louail et al., «From mobile phone data to the spatial structure of cities», Sci. Rep., vol. 4, no. 5276, pp. 1–12, Jun. 2014.
151. H. Klessig, V. Suryaprakash, O. Blume, A. Fehske, and G. Fettweis, «A framework enabling spatial analysis of mobile traffic hotspots», IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 3, no. 5, pp. 537–540, Aug. 2014.
152. M. A. Bayir, M. Demirbas, and N. Eagle, «Mobility Profiler: A framework for discovering mobility profiles of cell phone users», Perv. Mobile Comput., vol. 6, no. 4, pp. 435–454, Aug. 2010.

153. J. Yang et al., «Global and individual mobility pattern discovery based on hotspots», in Proc. ICC, London, U.K., Jun. 2015, pp. 1–6.
154. X. Yan, X. Han, B. Wang, and T. Zhou, «Diversity of individual mobility patterns and emergence of aggregated scaling laws», Sci. Rep., vol. 3, no. 2678, pp. 1–5, Sep. 2013.
155. H. Ali-Ahmad, C. Cicconetti, A. de la Olivia, M. Draexler, R. Gupta, V. Mancuso, L. Roullet, and V. Sciancaleporee, “CROWD: An SDN Approach for DenseNets,” in Second European Workshop on Software Defined Networks (EWSDN), 2013, pp. 25–31.

## ДОДАТОК 1. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор  
ПП "Цифрові технології"

Танчак З.В.



" 22" січня 2018 р.

### АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи  
Брича Миколи Володимировича  
на тему:

### Моделі та алгоритми функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку "

Даний акт складений про те, що у ПП "Цифрові технології" для керування безпроводними приймально-передавальними пристроями у експериментальній гетерогенній мережі мобільного зв'язку використані результати дисертаційної роботи Брича М.В. "Моделі та алгоритми функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку", представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а саме:

- алгоритм адаптивного вибору часового вікна для методу випадкового доступу з координуваним прослуховуванням середовища, що дало змогу знизити кількість колізій у 10 разів, шляхом використання ортогональних значень адаптивного часового вікна для окремих абонентських груп.
- імітаційна модель просторового аналізу активності абонентів у гетерогенній мережі мобільного зв'язку, що дало змогу досягти підвищення ефективності використання радіочастотних ресурсів на 30% при забезпеченні прийнятної обчислювальної складності алгоритму резервування ресурсів.

Внаслідок перевірки розроблених алгоритмів на мережному обладнанні у ПП "Цифрові технології" встановлено, що результати знаходяться в межах п'ятивідсоткового середньоквадратичного відхилення від поданих у дисертаційній роботі.

Провідний інженер



Дрофяк А.М.



### АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи

Брича Миколи Володимировича

на тему:

### " Моделі та алгоритми функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку "

Даний акт складений про те, що в Товаристві з обмеженою відповідальністю «Енерсет» (м. Львів) використані результати кандидатської дисертаційної роботи Брича М.В. "Моделі та алгоритми функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку ". А саме:

- розроблено та впроваджено алгоритм адаптивного використання неліцензійних частотних каналів абонентами LTE, який знизив рівень інтерференційних завад між абонентами LTE та Wi-Fi у неліцензійному частотному діапазоні, що дало змогу підвищити співвідношення сигнал/шум для абонентів від 10 до 15 дБ;
- розроблено та впроваджено алгоритм адаптивної агрегації радіочастот ліцензійного та неліцензійного діапазонів, що дало змогу вдвічі підвищити пікову пропускну здатність для абонентів гетерогенної мережі мобільного зв'язку.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТОВ "Енерсет", відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 5%.

Головний інженер

Гула Т.М.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and strokes, positioned above the printed name "Гула Т.М."



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з науково-педагогічної роботи  
НУ "Львівська політехніка"

доц. Давидчак О. Р.  
22 " 01 2018 р.

### АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи  
Брича Миколи Володимировича

### " Моделі та алгоритми функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку "

у навчальному процесі кафедри телекомунікацій

Даний акт складений комісією у складі:

- д.т.н., доц. Стрихалюк Б.М., голова методичної ради Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- к.т.н., доц. Озірковський Л.Д., декан базової вищої освіти Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- д.т.н., проф. Климаш М.М., завідувач кафедри телекомунікацій

про те, що в навчальному процесі кафедри телекомунікацій використано результати кандидатської дисертаційної роботи "Моделі та алгоритми функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку", а саме модернізовано курси лекцій з дисциплін:

- "Системи мобільного зв'язку" для базового напрямку 6.050903 «Телекомунікації» у частині теоретичних основ побудови гетерогенних мереж мобільного зв'язку;

- "Технології мереж мобільного зв'язку" для спеціальності 8.172 «Телекомунікації та радіотехніка» спеціалізації 8.172.01 «Інформаційні мережі зв'язку», у якому розглядається принцип агрегації радіочастотних ресурсів для підвищення пікової пропускної здатності мережі мобільного зв'язку.

Члени комісії:

Стрихалюк Б.М.

Озірковський Л.Д.

Климаш М.М.

## ДОДАТОК 2. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Strykhalyuk B. Implementation of wireless heterogeneous network based on LTE core virtualization for military communication systems / B. Strykhalyuk, I. Kahalo, M. Brych, M. Beshley, M. Seliuchenko // Системи озброєння і військова техніка. – Харків. - 2014. - С. 125-132.

2. Стрихалюк Б. М. Моделювання та тестування системи управління гетерогенної мережі доступу/ Б.М. Стрихалюк, М.І. Бешлей, Г.В. Холявка, М.В. Брич// Телекомунікаційні та інформаційні технології. – Київ. – 2015. – № 1. – С. 22–31.

3. Maksymyuk T. Stochastic Geometry Models for 5G Heterogeneous Mobile Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, V. Pelishok // Smart Computing Review. – 2015. – Vol. 5 – №2. – P. 89-101.

4. Maksymyuk T. Fractal Modeling for Multi-Tier Heterogeneous Networks with Ultra-High Capacity Demands / T. Maksymyuk, M. Brych, I. Strykhalyuk, M. Jo. // Smart Computing Review, 2015. – Vol. 5. – №4. – P. 346-355.

5. Максимюк Т. А. Оптимізація параметрів гетерогенних мереж мобільного зв'язку на основі фрактальної геометричної моделі / Т. А. Максимюк, М. В. Брич, М. М. Климаш // Наукові записки УНДІЗ. – Київ, 2015. – № 4 (38). – С. 5-16.

6. Demydov I. The Structural-Functional Synthesis of IoT Service Delivery Systems by Performance and Availability Criteria / Ivan Demydov, Yulia Klymash, Mykola Brych, Mykhailo Klymash // Internet of Things (IoT) and Engineering Applications (Canada). – May, 2017. – Vol. 2. – Issue 1. – P. 1-13.

7. Масюк А. Р. Алгоритм інтелектуального вертикального хендверу в гетерогенній мобільній мережі на основі хмарних обчислень / А.Р. Масюк, І.Б. Стрихалюк, М. В. Брич, І. О. Кагало, Г. В. Бешлей // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2017. - № 874. - С. 110–121.

8. Максимюк Т. А. Моделі стохастичної геометрії для гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління / Т. А. Максимюк, Р. А. Бурачок, І.Б. Чайковський, М. В. Брич // Комп'ютерні технології друкарства. – Львів, 2015. – № 33. – С. 112-119.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (форма участі здобувача):*

9. Maksymyuk T. Fractal Geometry Based Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, A. Masyuk // Proceedings of international conference IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2015), (Kharkiv, October 13-15, 2015). – Kharkiv, Ukraine, 2015 – P. 69-72. (Очна участь здобувача із доповіддю).

10. Krasko O. Flexible backhaul architecture for densely deployed 5G small cells based on OWTDMA network / O. Krasko, M. Brych, A. Masyuk, M. Klymash // Проблеми інфокомунікацій. Наука і технології: Матеріали 3-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 4-6 жовтня 2016 р.). – 2016. – P. 33–35. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

11. Demydov I. Mobility management and vertical handover decision in an always best connected heterogeneous network / I. Demydov, M. Seliuchenko, M. Beshley, M. Brych // 14th International Conference on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), (Lviv-Poljana, Ukraine February 24-27, 2015) – Lviv Polytechnic Publishing House, 2015 – P.103-105. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

12. Maksymyuk T. An IoT based monitoring framework for software defined 5G mobile networks/ T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Brych, D. Satria, M. Jo // ACM IMCOM 2017: Proceedings (January 5–7, 2017, Beppu, Japan). – 2017. – P. 105. (Форма участі - заочна).

13. Maksymyuk T. Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network/ T.Maksymyuk, M.Brych, M. Klymash, M. Jo // 2nd International Conference on Advanced Information and Communication

Technologies (AICT), (Lviv, Ukraine, July 4-7, 2017) – Lviv Polytechnic Publishing House, 2017. – P.197-200. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

14. Maksymyuk T. Game Theoretical Framework for Multi-Operator Spectrum Sharing in 5G Heterogeneous Networks/ T. Maksymyuk, M. Brych, Y. Klymash, M. Kyryk, M. Klymash // Proceedings of international conference IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2017), (Kharkiv, October 10-13, 2017). – Kharkiv, Ukraine, 2017. – P. 515-518. (Очна участь здобувача із доповіддю).

15. Максимюк Т. А. Метод синтезу OFDM сигналу на основі вейвлетних функцій / Т. А. Максимюк, С. С. Думич, М. В. Брич // П'ятнадцята відкрита науково-технічна конференція Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки з проблем електроніки та інфокомунікаційних систем, (Львів, 3-6 квітня 2012 р.) – Львів, 2012. – С. 81. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

16. Максимюк Т. А. Підвищення спектральної ефективності радіосистем з ортогональним частотним розділенням / Т. А. Максимюк, С. С. Думич, М. В. Брич // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми телекомунікацій – 2012" (Київ, 24-27 квітня 2012 р.) – Київ, 2012. – С. 207-209. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

17. Максимюк Т. А. Підвищення завадостійкості сигнальних конструкцій в системах з ортогональним частотним мультиплексуванням / Т. А. Максимюк, В. О. Пелішок, А. Т. Ратич, М. В. Брич // Матеріали науково-методичної конференції "Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2012" (Львів, 1-4 листопада 2012 р.) – Львів, 2012. – С.41-44. (Очна участь здобувача із доповіддю).

18. Krasko O.V. Dynamic Bandwidth Allocation for 5G Optical Backhaul Networks with Wavelength Division Multiplexing / Krasko O.V., Brych M.V., Al-Ansari A., Qasim N. // International Scientific-Practical Conference "Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication," Nov. 9-11, 2017, Chernivtsi, Ukraine, P. 110-111. (Очна участь здобувача, співдоповідач).