

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

КАГАЛО ІГОР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.396

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ
ОБСЛУГОВУВАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ МЕРЕЖ LTE/WI-FI**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Климаш Михайло Миколайович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри телекомунікацій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Толупа Сергій Васильович, Київський національний
університет імені Тараса Шевченка, професор кафедри
кібербезпеки та захисту інформації;

доктор технічних наук, доцент
Єременко Олександра Сергіївна, Харківський
національний університет радіоелектроніки,
доцент, професор кафедри інфокомунікаційної
інженерії
ім. В. В. Поповського.

Захист дисертації відбудеться “10” липня 2020 р. о 12⁰⁰ год на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “09” червня 2020 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н



М. І. Бешлей

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Упродовж останніх десятиліть трафік у мережах як мобільного, так і фіксованого зв'язку експоненційно зростає. Це пов'язано як і з кількісним зростанням користувачів мобільного зв'язку, так і з розвитком нових послуг, що вимагають від мереж значної пропускну здатності. Сучасні мережі не спроможні обслуговувати прогнозовані великі обсяги мобільного трафіку з належною якістю (Quality of Service, QoS). Тому необхідна побудова мереж мобільного зв'язку нового покоління на основі існуючих технологій. Розгортання малих комірок, за рахунок невеликої площі покриття дає змогу значно покращити системну спектральну ефективність, а також розвантажити інфраструктуру макрокомірок. Однак розміщення базових станцій з більш високою щільністю для збільшення ємності мережі неминуче призведе до зростання складності уникнення інтерференційних завад, збільшення вартості розгортання мережі, а також додаткових енергетичних та економічних витрат на підтримку її працездатності. Водночас на сьогоднішній день, ліцензований радіоспектр є досить обмеженим і тому дорогим ресурсом, а традиційні методи підвищення ефективності його використання наближаються до своїх теоретичних обмежень. Як наслідок, актуальним завданням є інтеграція різних технологій радіодоступу в більш складну гетерогенну мережу зв'язку, а також розроблення методів ефективного використання радіоресурсів, які доступні в різних частотних діапазонах та асоційовані з різними технологіями радіодоступу. Зокрема, очікується, що істотний приріст ємності можна отримати за рахунок побудови гетерогенної архітектури мережі, яка могла б об'єднати ліцензований і неліцензований радіочастотний ресурс, а саме останні наукові дослідження вказують на те, що взаємодія систем LTE і Wi-Fi дасть змогу ефективно використовувати позитивні аспекти функціонування обох технологій, а їх інтеграція стане ще тіснішою в рамках побудови мереж зв'язку 5G аж до повсюдного застосування суміщених LTE/Wi-Fi модулів.

Дослідженням завдань побудови та підвищення ефективності сучасних мереж мобільного зв'язку активно розглядалися такими провідними українськими та зарубіжними вченими як А.І. Семенко, К. С. Сундучков, В.М. Безрук, Л. С. Глоба, Р.С. Одарченко, Ю. Ю. Коляденко, М. Jo, Н. Hwa-Chen, X. Ge, С. Cho, М. Dohler, О. Sallent, N. Malouch та багатьма іншими. Серед іноземних дослідників слід відзначити роботи М. Jo, Н. Hwa-Chen у яких розглянуто правила, принципи і типові сценарії впровадження LTE-U (LTE-Unlicensed) на основі 5 ГГц діапазону. Зокрема, встановлено, що найбільш критичною проблемою LTE-U є співіснування з іншими неліцензованими системами, такими як Wi-Fi. У роботах N. Malouch, G. Bianchi, розглядаються аналітичні моделі з використанням різних підходів випадкового доступу для розрахунку ймовірності колізій, які виникають у мережах Wi-Fi, та їх впливу на пропускну здатність.

Незважаючи на велику кількість різноманітних рішень для підвищення ефективності мереж мобільного зв'язку, невирішеними досі залишаються завдання адаптивного формування структури рівня радіодоступу в умовах наявності великої кількості абонентських пристроїв та координованого використання неліцензійного діапазону Wi-Fi для підвищення спектральної ефективності.

Таким чином, зростання обсягів мобільного трафіку, спонукають до розв'язання науково-практичного завдання підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi шляхом розроблення методів адаптивного управління доступом до неліцензійного частотного діапазону, планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу, а також удосконалення алгоритму обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для боротьби з короткочасними відмовами каналу в умовах передавання відеопотоків реального часу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано у межах держбюджетної науково-дослідної теми «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання», (2017–2018 рр.), № держреєстрації 0117U004449 та держбюджетної науково-дослідної теми «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні», (2018–2019 рр.), № держреєстрації 0117U007177.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi шляхом розроблення методу адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу з координацією міжкоміркової інтерференції в умовах зміни локалізації абонентського навантаження, також алгоритму обслуговування черг каналного рівня в мережі Wi-Fi для передавання даних у каналах з короткочасними втратами зв'язку.

Досягнення поставленої мети здійснюється розв'язанням таких завдань:

1. Аналіз існуючих методів розвитку мереж мобільного зв'язку LTE/ LTE-U.
2. Удосконалення методу адаптивного управління доступом до неліцензійного радіоканалу в умовах спільного співіснування систем Wi-Fi та LTE-U.
3. Удосконалення алгоритму обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для передавання даних, із забезпеченням необхідної якості, у каналах з короткочасними втратами зв'язку.
4. Розроблення методу адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi.
5. Розроблення алгоритму моніторингу та аналізу стану радіодоступу інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі для підвищення енергоефективності мережі.
6. Розроблення імітаційної моделі гетерогенної мережі з набором інтегрованих між собою технологій радіодоступу LTE/Wi-Fi.
7. Практична реалізація та оцінювання ефективності запропонованих рішень в умовах розгортання мереж LTE/Wi-Fi.

Об'єкт дослідження – процес функціонування інтегрованих LTE/Wi-Fi мереж з адаптивним використанням радіочастотних ресурсів.

Предмет дослідження – методи та алгоритми адаптивного управління ресурсами в безпроводних LTE/Wi-Fi мережах для забезпечення необхідної якості обслуговування.

Методи дослідження. У роботі знайшли своє застосування теорія систем та мереж масового обслуговування, аналітичні, імітаційні методи дослідження, а також методи натурального експерименту.

Наукова новизна роботи полягає у тому, що:

1. Вперше запропоновано *метод адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi*, який на відміну від відомих, використовує діаграми Вороного для адаптивної зміни структури мережі радіодоступу та розподілу загальної смуги частот між центральною і граничною зоною комірки LTE в залежності від локалізації абонентського навантаження, що дало змогу уникнути міжкоміркової інтерференції, підвищити якість обслуговування та енергоефективність мережі.

2. Удосконалено *метод адаптивного управління доступом до неліцензійного частотного діапазону в умовах одночасного функціонування систем Wi-Fi та LTE-U*, який на відміну від відомих, базуючись на вимогах QoS користувачів централізовано приймає обґрунтовані рішення щодо частки використання радіоресурсів оператором мобільного зв'язку LTE, що дало змогу підвищити ефективність використання ресурсів та швидкість передавання даних в гетерогенних мережах LTE з уникненням міжсистемної інтерференції.

3. Набула подальшого розвитку *імітаційна модель гетерогенної мережі з набором інтегрованих між собою технологій радіодоступу LTE/Wi-Fi*, яка на відміну від відомих, враховує стохастичну геометрію розміщення вузлів мережі спільно з особливостями обслуговування потоків трафіку користувачів в часі, що дало змогу визначити ефективність запропонованих рішень, отримати сценарії поведінки та обслуговування абонентів близькі до реальних.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Комплексне використання модифікованого методу повторного розподілення частот між комірками LTE в умовах адаптивного формування структури радіодоступу та неліцензійного діапазону частот, дало змогу підвищити на 25 % швидкість передавання даних для абонентів інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі з уникненням міжкоміркової інтерференції.

2. Запропоновано алгоритм моніторингу та аналізу стану радіодоступу інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі, який дає змогу підвищити енергоефективність мережі на 30-42% при зменшенні середньої пропускну здатності мережі на 1% -4%.

3. Реалізовано метод адаптивного формування розміру комірки безпроводної мережі, що дало змогу підвищити якість обслуговування за критерієм пропускну здатності точки доступу на 36% в умовах пікових навантажень на окремі групи комірок шляхом ефективного управління ресурсами мережі в залежності від фактичного сценарію функціонування та вимог окремих користувачів.

4. Розроблено імітаційну модель інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi на базі інформаційної мережі НУ "Львівська політехніка" в середовищі Ornet Modeler, яка дає змогу вибрати оптимальні рішення, щодо вибору алгоритмів обслуговування черг на мережевих пристроях для забезпечення необхідного рівня QoS.

5. Запропоновано алгоритм обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для боротьби з короткочасними відмовами каналу при передаванні декількох відеопотоків реального часу, що дало змогу в інтегрованій LTE/Wi-Fi мережі покращити якість надання відео послуг від 5% до 45% оціненої за критерієм MSE.

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено для підвищення енергоефективності, якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами в телекомунікаційних мережах ТзОВ ВТФ "Контек", ТзОВ "Телекомунікаційна компанія", що підтверджено актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Усі результати наукових, теоретичних і практичних досліджень, викладені в дисертації, автор одержав особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертантові належать: у роботі [1] – розроблення методу адаптивного управління мережними ресурсами в телекомунікаційних мережах, [2, 4] – розроблення та дослідження імітаційної моделі гетерогенної мережі з набором інтегрованих між собою технологій радіодоступу, [3] – метод адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi, [5-6] – алгоритми підвищення якості обслуговування в мережах LTE/Wi-Fi, [7, 15] – розроблення баз даних для інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі, [8-10] – метод адаптивного управління ресурсами в гетерогенних мережах стандарту LTE, [11] – алгоритм обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для боротьби з короткочасними відмовами каналу, [12] – алгоритм моніторингу стану радіодоступу інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі для підвищення енергоефективності та якості обслуговування, [13 - 14] – імітаційна модель корпоративної мережі для оцінки QoS.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень доповідалися та обговорювалися на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях: Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» (м. Львів-Славське 2012, 2018 рр.); 5-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (2014 р., м. Чернівці); Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці» (м. Львів-Поляна, 2015, 2019 рр.); IEEE Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (м. Львів, 2019 р.); International IEEE Conferences on Advanced Information and Communication Technologies-2015, 2019 (м. Львів, 2015, 2019 рр.). Також результати роботи у повному обсязі обговорені на засіданнях та семінарах кафедри телекомунікацій.

Публікації. За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 15 наукових праць, серед них 1 стаття в іноземному науковому періодичному виданні за напрямом дисертації [1], 4 статті у наукових фахових виданнях згідно з переліком МОН України [2–6] та 9 публікацій у збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій [7–15].

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Загальний обсяг роботи становить 195 сторінок друкарського тексту, із них 7 сторінок вступу, 133 сторінки основного тексту, 76 рисунків, 5 таблиць, список використаних джерел зі 200 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про впровадження результатів роботи, її апробацію, публікації та особистий внесок здобувача.

У першому розділі роботи – «Аналіз технологій мобільного зв'язку та перспективи впровадження гетерогенних мобільних мереж» проведено аналіз розвитку технологій LTE та LTE-U. Встановлено, що стрімке зростання обсягів клієнтського трафіку в мережах мобільного зв'язку, зміна його характеру і структури

потребують безперервного і значного збільшення пропускної здатності цих систем. Технології радіоінтерфейсів практично досягають теоретичних меж каналної пропускної здатності, тому подальшим шляхом для підвищення ємності мережі є використання неліцензійного діапазону частот та вдосконалення методів управління розподілом радіоресурсів. Розглянуто ряд технічних завдань, які необхідно вирішити в інтегрованих LTE/Wi-Fi мережах, а саме: планування мережі, зменшення рівня інтерференційних завад, управління мережею та її самоорганізація тощо. З проведеного аналізу випливає, що існуючі методи підвищення ефективності функціонування інтегрованих мереж мобільного зв'язку не дають змоги отримати гнучку, керовану, адаптивну та енергоефективну систему з прогнозуванням навантаження від абонентів та орієнтацією на задоволення QoS вимог користувача.

У другому розділі роботи – «**Методи і алгоритми адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi з уникненням інтерференції**» запропоновано концептуальну модель інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі, ієрархічна структура якої складається з комірок різного розміру (пікосоти, фемтосоти, точки доступу Wi-Fi, суміщені LTE/Wi-Fi модулі) (рис.1). Зростання популярності мереж Wi-Fi і використання їх операторами мобільного зв'язку для розвантаження своїх стільникових мереж загрожують якості роботи інтегрованої мобільної системи, що функціонує в неліцензованих частотних діапазонах. Усунення даного недоліку вимагає розробки ефективних засобів координування інтерференційних завад, спільного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу. Відповідно, у роботі запропоновано метод адаптивного управління доступом до неліцензійного радіоканалу в умовах одночасного функціонування систем Wi-Fi та LTE-U для забезпечення QoS. Розглянемо модель інтегрованої мережі (рис. 2), яка складається із S LTE базових станцій малого розміру SBS, двостандартної взаємодії, що можуть працювати як у ліцензійному так і в неліцензійному діапазонах та W точок доступу Wi-Fi (Wi-Fi access points WAPs), які не перекриваються.

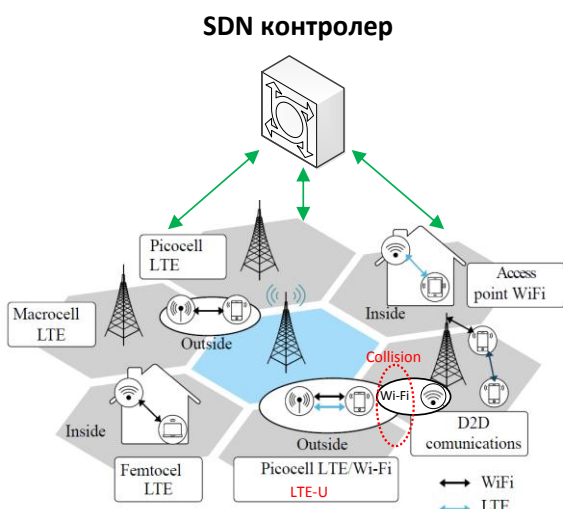


Рис. 1. Концепція інтегрованої мобільної мережі наступного покоління

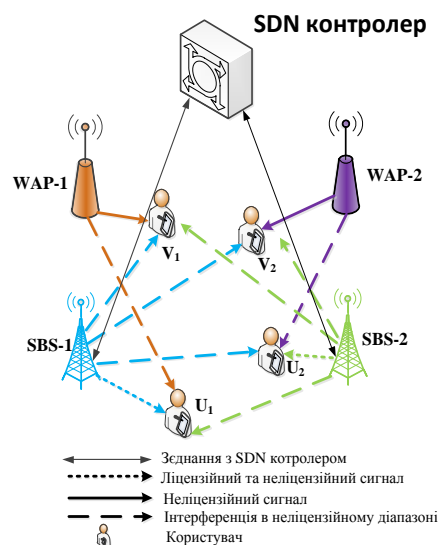


Рис. 2. Модель інтегрованої мережі LTE-U та Wi-Fi

У роботі розглянуто вплив технології LTE-U на швидкість передавання даних в мережі Wi-Fi в умовах одночасного функціонування. У випадку, коли

неліцензований канал повністю використовується у WAP, то максимальна швидкість передавання для користувача $v \in V_w$, підключеного до WAP $w \in W$ становитиме $R_{w,v}^{\max}$. В умовах, коли всі SBS використовують ту ж саму не ліцензовану смугу частот, що і WAP, швидкість передавання даних, що досягається кожним $v \in V_w$ користувачем буде набагато меншою та становитиме $R_{w,v}^{\min}$. Таким чином, швидкість передавання даних в мережі Wi-Fi варіюється в межах від $[R_{w,v}^{\min}, R_{w,v}^{\max}]$. Для справедливого співіснування систем Wi-Fi і LTE-U, необхідно розділяти часові інтервали доступу до спільного каналу таким чином, щоб WAP могли підтримувати мінімальні швидкості передавання даних для своїх користувачів, а SBS мали змогу, принаймні, покращити деяким користувачам якість надання послуг. Оскільки система LTE-U керує фізичними ресурсами централізовано, а не так як це робить (Distributed Coordination Function) DCF у WAP, SBS повинні визначити відповідний інтервал часу для досягнення мінімальної пропускну здатності для кожного користувача Wi-Fi. Коли SBS відмовляються від частки неліцензованого спектру для WAP в межах часового інтервалу $\tau \in [0, 1]$, то швидкості передавання користувачів Wi-Fi і LTE-U визначаються як:

$$R_{w,v}(\tau) = R_{w,v}^{\max} \cdot \tau, \forall v \in V_w, \quad (1)$$

$$R_{i,j}(\tau, x_i, y_i) = R_{i,j}^l(x_i) + (1 - \tau)R_{i,j}^u(y_i), \quad (2)$$

де $R_{i,j}^l(x_i)$ швидкість передавання даних $j \in U_i$ користувача i -ї SBS в ліцензійному діапазоні частот мережі LTE при виділенні x_i каналних ресурсів та в неліцензійному $R_{i,j}^u(y_i)$ мережі LTE-U при виділенні y_i каналних ресурсів.

Таким чином, сумарна швидкість SBS $i \in S$, коли вона розділяє часовий інтервал τ з WAP, є наступною:

$$R_i(\tau, x_i, y_i) = \sum_{j \in U_i} R_{i,j}(\tau, x_i, y_i), \quad (3)$$

Тепер наша проблема обмежена неліцензованим спектром, щоб максимізувати сумарну швидкість SBS після поділу часу τ з WAP, зберігаючи при цьому QoS для більшості користувачів. Для цього необхідно розробити ефективну схему розподілу спектру для кожної SBS i , щоб максимізувати функцію корисності $U_i(\tau, y_i) = \sum_{j \in U_i} \log((1 - \tau)R_{i,j}^u(y_i))$ у неліцензованому спектрі.

$$\max_{\tau, y_i} U_i(\tau, y_i), \forall i \in S, \quad (4)$$

$$C_1 : \sum_{j \in U_i} y_{i,j}^{k'} \leq 1, \forall k' \in C_u^i, \quad (5)$$

$$C_2 : \sum_{j \in U_i} \sum_{k' \in C_u^i} y_{i,j}^{k'} \leq |C_u^i|, \quad (6)$$

$$C_3 : R_{i,j}(\tau, x_i, y_i) \geq Q_{i,j}, \forall j \in U_i, \quad (7)$$

$$C_4 : y_{i,j}^{k'} \in \{0, 1\}, \forall k' \in C_u^i, \forall j \in U_i, \quad (8)$$

$$C_5 : R_{w,v}^{\min} \leq R_{w,v}(\tau) \leq R_{w,v}^{\max}, \forall v \in V_w, \quad (9)$$

$$C_6 : 0 \leq \tau \leq 1 \quad (10)$$

Вираз (5) вказує на те, що один неліцензований підканал може бути використаний не більше ніж одним користувачем LTE-U, де k' – виділений підканал із загальної неліцензійної смуги C_u^i . Обмеження загальних ресурсів у цьому спектрі

представлені виразом (6) для кожної SBS. Вимога щодо QoS користувачів LTE-U виражено у (7), де $Q_{i,j}$ – вимоги щодо якості обслуговування j користувача, що перебувають у зоні обслуговування i SBS мережі. Вираз (8) встановлює або 0, або 1 і вказує на вектор виділення ресурсів. Вирази (9) і (10) обирають інтервал доступу до середовища τ в рамках мінімальної та максимальної швидкостей.

У роботі проведено дослідження відомого алгоритму CSAT (Carrier Sense Adaptive Transmission), який призначений для справедливого розділення ресурсів у мережах LTE і Wi-Fi, шляхом встановлення часового інтервалу $\tau=0,5$. Допустимо, що тривалість цього інтервалу буде рівною 1 мс як для мережі LTE, так і для Wi-Fi. Почерговий доступ до середовища розділить ресурси порівну, така робота алгоритму CSAT зображена на рис. 3а. Також припустимо іншу ситуацію, коли двом користувачам потрібні певні послуги у різні моменти часу, які вимагають різних швидкостей передавання даних. Але вони використовують різні технології: один з них – мережу LTE-U (рис. 4а), інший – Wi-Fi (рис. 5а). Максимальні пропускні здатності цих мереж однакові, а саме 50 Мбіт/с. Однак, користувачеві Wi-Fi у деякі моменти часу потрібно більше ресурсу, ніж канал може надати, і як наслідок його якість обслуговування погіршується. При цьому у користувача LTE на протязі всього часу задовільна якість обслуговування, і не використовується весь ресурс. Використання алгоритму CSAT для цього недостатньо. Тому, щоб удосконалити CSAT скористаємось формулами (7-10). Для цього необхідно динамічно в часі змінювати інтервал τ , відповідно до вимог користувача. Тому, змінивши пріоритет з LTE на Wi-Fi (рис. 3б), можна буде передати більше даних, у проміжок часу 5 мс для Wi-Fi, ніж як це було на рис. 3 за 1 мс. Іншими словами, максимальна швидкість каналу в такому випадку збільшиться для користувача Wi-Fi (рис. 5б).

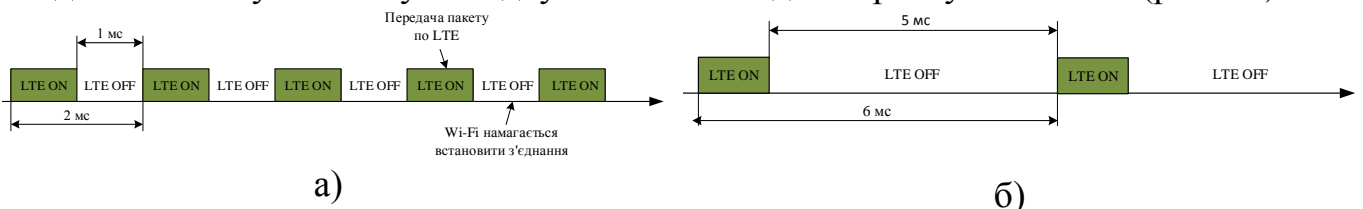


Рис. 3. Принцип роботи методу CSAT – а) та запропонованого методу адаптивного управління доступом до радіоканалу – б)

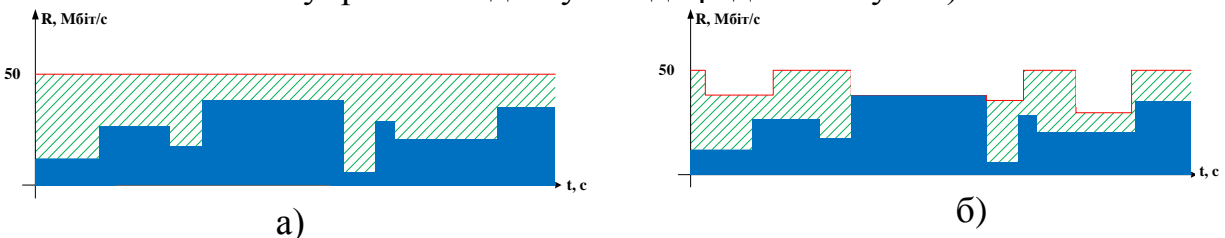


Рис. 4. Часова діаграма вимог пропускної здатності для користувача LTE-U (CSAT) – а) та після застосування запропонованого методу – б)

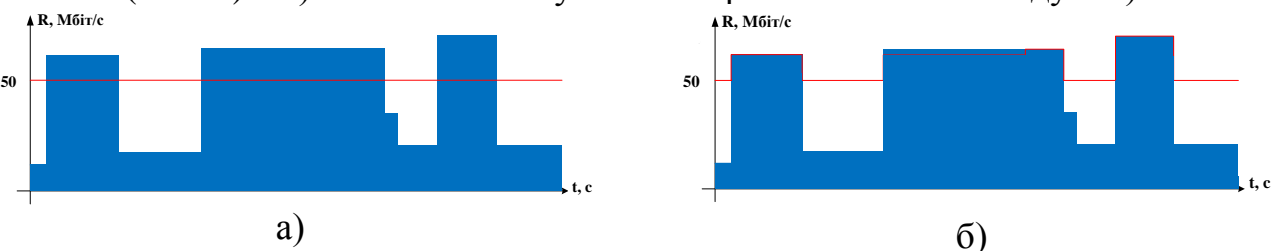


Рис. 5. Часова діаграма вимог пропускної здатності для користувача Wi-Fi (CSAT) – а) та після застосування запропонованого методу – б)

Як видно з рис. 4б, у користувача технології LTE-U в моменти часу, коли ресурс каналу не використовувався на максимум, пропускна здатність знизилась, проте це ніяким чином не вплинуло на якість обслуговування. Це дало можливість задовільнити QoS користувача Wi-Fi у ті відрізки часу, коли це було потрібно.

У роботі також запропоновано **алгоритм обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для передавання даних, із забезпеченням необхідної якості, у каналах з короткочасними втратами зв'язку**. Для подолання наслідків короткочасних втрат зв'язку (інтерференція, низький рівень сигналу), що можуть виникнути у мережах Wi-Fi в умовах масового розгортання LTE-U, розробляється дисципліна обслуговування черги на каналному рівні, в основу якої вкладено наступні ідеї:

1. Щоб не погіршити якість передавання відеопотоку отримувачам, для яких не було відмови каналу (тут і надалі для зручності опису будемо називати таких отримувачів «задоволеними якістю»), станція-джерело не повинна зменшувати кількість каналних ресурсів, які витрачаються на обслуговування цих отримувачів.

2. Щоб мінімізувати втрати якості передавання відеопотоку отримувачам, для яких відбулась відмова каналу (тут і надалі для зручності опису будемо називати таких отримувачів «незадоволеними якістю»), станція-джерело не повинна відкидати пакет після здійснення граничної кількості (Retry limit) $RL=7$ спроб передавання пакета, надаючи можливість пакету бути переданим до тих пір, доки не буде перевищено обмеження на час доставляння пакета.

Щоб поєднати ці дві суперечливі на перший огляд ідеї, запропоновано відмовитись від дисципліни FIFO, яка використовується по замовчуванню в користь так званої модифікованої дисципліни обслуговування черги (PR.A-2), принцип роботи якої описано нижче. Перед передаванням пакета 1-ому отримувачу для якого відбулася відмова каналу, станція-джерело перевіряє, чи може ця передача викликати втрату пакетів для одного з «задоволених якістю» отримувачів. Наступним кроком, для кожного пакета отримувачів «задоволених якістю», що знаходяться у загальній черзі перевіряється умова :

$$T_{\max} > t_1 + \sum_{j=4}^i t_j, \quad (11)$$

де T_{\max} – максимальна величина затримки i -го пакета, t_1 – час обслуговування пакета для «незадоволеного якістю» отримувача та t_j – сумарний час перебування в черзі j -тих пакетів для «задоволених якістю» отримувачів до i -го пакета включно.

Згідно даної умови час перебування пакетів для «задоволених якістю» отримувачів не повинен перевищувати значення максимально можливої величини затримки пакетів при якій не відбувається погіршення якості обслуговування відео потоків реального часу. Таким чином досягнувши критичного значення часу очікування у черзі, першочергово передаватимуться пакети користувачів для яких не відбувалося відмови каналу.

У роботі розроблено **метод адаптивного формування багаторівневої структури радіодоступу інтегрованих мереж LTE/WI-FI/LTE-U з уникненням інтерференції**. Рівень радіодоступу функціонуватиме ефективніше, якщо покриття формуватиметься залежно від статистики локалізації абонентського навантаження, яка є в оператора мобільного зв'язку. В місцях де спостерігається велике абонентське навантаження, малі комірки мають бути встановлені щільніше, в місцях

з малим абонентським навантаженням навпаки. Важливу роль для оператора має енергоефективність мережі, оскільки в гетерогенних мережах, у порівнянні з однорівневими з'являється велика кількість малих комірок. Хоча вони є малопотужними, але в сукупності рівень малих комірок використовує багато електроенергії. При цьому слід врахувати, що абонентське навантаження розподілене нерівномірно по території. Велику частину малі комірки не обслуговують абонентів взагалі. Для оператора було б вигідно, щоб базові станції працювали лише тоді, коли це потрібно. Коли базові станції не обслуговують

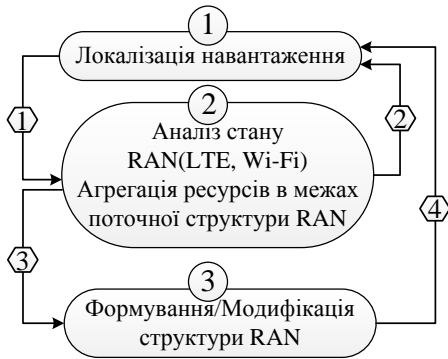


Рис.6. Блок-схема методу адаптивного формування структури рівня радіодоступу

жодного абонента слід їх переводити в режим енергозбереження і тим самим формувати структуру RAN (Radio Access Network), яка буде підлаштовуватися під потреби абонентів, тобто параметри рівня радіодоступу будуть динамічно змінюватися залежно від абонентського навантаження та карти покриття точок доступу Wi-Fi. Знаючи розташування точок доступу Wi-Fi можна уникнути міжсистемної інтерференції шляхом вибору технології обслуговування. Наприклад, в місцях із щільним покриттям Wi-Fi пропонується обслуговувати абонентів технологією LTE. У місцях де немає Wi-Fi покриття, абонентів можна обслуговувати використовуючи інтегровані базові станції, які

працюють, як на ліцензійних частотах LTE так і на неліцензійних частотах LTE-U, що дасть змогу забезпечити більшу швидкість передавання даних для кінцевих користувачів. Метод адаптивного формування структури рівня радіодоступу базується на трьох основних етапах представлених у вигляді алгоритму (рис. 6).

На першому етапі на основі сигналізаційних даних від абонентів здійснюється локалізація навантаження та створюється карта навантаження. Аналогічно припускається, що операторам відомо карту покриття технологією Wi-Fi. На другому етапі методу аналізується інформація, отримана в результаті виконання першого етапу та на її основі приймається рішення про те, яким чином обслуговувати користувачів. На третьому етапі приймається автоматизоване рішення про модифікацію, або формування (якщо не була створена до цього моменту) структури рівня радіодоступу.

Розглянемо детально роботу даного алгоритму. Усі абоненти на початковому етапі підключаються до макрокомірки $M(S)=\{MC_1, MC_2, \dots, MC_i\}$. Кожен абонент характеризується набором параметрів: Порогова потужність (P_{nop}) випромінювання від абонента до базової станції; SINR; QoS_class. Згідно цих параметрів UE формує запит на обслуговування (QoSrequest), який відсилається по каналу «вверх» (Uplink, або UL) до базових станцій. Варто зазначити, що у всіх базових станцій малих комірок, що знаходяться в режимі енергозбереження є вимкнутим канал «вниз» (Downlink), увімкнутим залишається лише канал «вверх».

Після того, як на вхід базової станції макро рівня прийшла інформація від абонентів, вона дасть вказівку малим коміркам, використовуючи UL, визначити CSI (Channel State Information), а саме вектор зміни відстані до базової станції (БС) за рахунок зміни потужності сигналу (ΔP_{UL_UEi}), в результаті чого для кожної малої комірки сформується матриця «допустимих абонентів» $\{K\}$, яка містить інформацію

про всіх абонентів, що потенційно можуть бути обслужені конкретною базовою станцією. Формування карти навантаження відбувається наступним чином: контролер проводить аналіз матриць $\{K_i\}\{S_i\}$ ($\{K_i\}$ – матриця абонентських пристроїв, які потенційно можуть бути обслужені БС, $\{S_i\}$ – матриця абонентських пристроїв, які вже обслуговуються БС) та «відкидання» абонентів, які не можуть бути обслужені через невідповідність параметрів якості.

$$K_i = [UE_{reserv}, UE_{reserv}, \dots, UE_{reserv}], S_i = [UE_{current}, UE_{current}, \dots, UE_{current}], \quad (12)$$

де UE_{reserv} – абонентський пристрій, який знаходиться в радіусі дії комірок SC^N, SC^{N-1} та потенційно може бути нею обслужений, $UE_{current}$ – абонентський пристрій, який обслуговується в даний момент SC^N, SC^{N-1}

В результаті для кожної базової станції рівня SC^N, SC^{N-1} утворюються матриці $\{K'\}$, які міститимуть інформацію про абонентів, яких потрібно обслужити конкретною базовою станцією. Керуюча інформація передається на нижчий рівень і формується результуюча карта поточного навантаження R_i .

$$R_i = \sum K_i + \sum S_i, \quad (13)$$

Для кожної з малих комірок утворюється матриця абонентів $\{K'\}$, які потенційно повинні бути обслужені конкретною базовою станцією.

$$K'_i = K_i - \sum UE_{notserviced}, \quad (14)$$

$UE_{notserviced}$ – абонентський пристрій, який не може бути обслужений конкретною базовою, через невідповідність параметрів низхідного каналу або мобільності.

На основі керуючої інформації та карти поточного навантаження формується матриця $\{R'\}$, яка містить в собі інформацію про стан абонентів, що вже є на обслуговуванні структурою рівня радіодоступу та інформацію про абонентів, що потенційно повинні бути обслужені конкретною базовою станцією.

$$R'_i = \sum K'_i + \sum S_i. \quad (15)$$

Система вирішує як надати сервіс UE в межах кожної базової станції. Вибір робиться на основі трьох правил:

1) Якщо в UE високе значення вектора зміни відстані до БС, то обслуговування відбуватиметься макрокоміркою MC_{Di} . Також макрокоміркою будуть обслуговуватися абоненти з будь-яким QoS_class , якщо немає можливості їх підключення до альтернативної SC малої комірки.

2) Якщо в абонента низьке значення вектора зміни відстані до БС та великі вимоги до трафіку $QoS_classmax$ і підключення його до активних структурних елементів рівня радіодоступу не спричинить перенавантаження, то система підключить його до відповідної SC і за можливості використовуючи агрегацію до базової станції MC_{Di} . Таким чином, за рахунок агрегації частот забезпечується краща якість обслуговування. Після цього проводиться перевірка матриць $\{K_i\}$ і $\{S_i\}$, щоб з'ясувати чи є потреба у зміні структури рівня радіодоступу, тобто вимкненні малих комірок. Якщо така потреба виникла, то керування передається до третього блоку, якщо ж ні, то перебудовується карта поточного навантаження і керування передається на перший етап загального алгоритму.

3) Якщо в UE низьке значення вектора зміни відстані до БС та абонент потребує великих обсягів трафіку $QoS_classmax$ і немає можливості підключення його до активних структурних елементів рівня радіодоступу виноситься рішення про

застосування додаткових малих комірок та керування передається на третій етап загального алгоритму.

Після отримання інформації про UE_i , що мають бути обслужені конкретною базовою станцією та матриці $\{Si\}$, що містить інформацію про активних абонентів малих комірок і використовуючи дані про розміщення БС та зону їх покриття, контролер вирішує, які базові станції та їхню кількість необхідні для обслуговування поточного навантаження. Як результат відбувається перебудова структури мережі рівня радіо доступу. Якщо макрокомірка перевантажена, то застосовується обслуговування абонентів за технологією LTE-U, яка використовує 5 ГГц неліцензійний діапазон Wi-Fi.

У дисертаційній роботі запропоновано модифікований метод повторного розподілення частот між комірками LTE для уникнення міжкоміркової інтерференції в умовах адаптивного формування радіоструктури на основі теселяції Вороного. Згідно даного методу кожна комірка неправильної форми розділена на дві зони - центральна і гранична. На відміну від відомого методу часткового повторного використання частот, в якому розподіл загальної смуги частот відбувається статично, запропонований метод динамічно визначає розподіл смуги частот між центральною та граничною зоною комірки в залежності від місця локалізації навантаження. В умовах коли користувачі нерівномірно розподілені в комірці, кожна зона матиме різну кількість користувачів, відповідно чим більша кількість користувачів у певній зоні, тим більша необхідна пропускна здатність для цієї зони, що у свою чергу вимагає ширшої смуги каналу. Тому, важливо динамічно розподілити спектр відповідно до вимог у кожній зоні. Схеми фіксованого та динамічного розподілу частоти показано на рис. 7 та рис. 8.

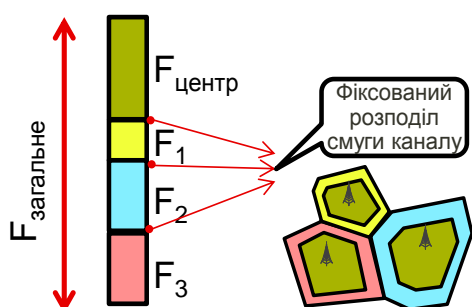


Рис. 7. Фіксований розподіл смуги частот між зонами комірок (існуючий підхід)

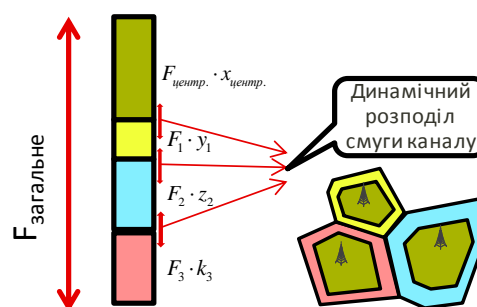


Рис. 8. Динамічний розподіл смуги частот між зонами комірок (запропонований підхід)

Метод з динамічним розподілом смуги частот між зонами комірки:

$$F_{заг.} = F_{центр.} \cdot x_{центр.} + F_1 \cdot y_1 + F_2 \cdot z_2 + F_3 \cdot k_3, \quad (16)$$

де $x_{центр.}$, y_1 , z_2 , k_3 - коефіцієнти частки використання частот

$$x_{центр.} + y_1 + z_2 + k_3 = 1, \quad (17)$$

$$F_{заг.комірки_1} = F_{центр.} + F_1, \quad (18)$$

$$F_{заг.комірки_2} = F_{центр.} + F_2, \quad (19)$$

$$F_{заг.комірки_3} = F_{центр.} + F_3. \quad (20)$$

Отже, запропонований спосіб адаптивного управління ресурсами, дасть змогу обслуговувати користувачів, що знаходяться в граничній і центральній площі

комірки із необхідним рівнем якості. А також, дозволить уникнути міжкоміркової інтерференції, простою ресурсів мережі та підвищити загальну пропускну здатність системи в порівнянні з існуючими методами.

У третьому розділі роботи – «Моделювання та дослідження енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi» моделюється та досліджується ефективність функціонування мережі в умовах використання запропонованих рішень у другому розділі. Топологія модельованої інтегрованої мережі LTE/LTE-U/Wi-Fi показана на рис. 9. При низькому навантаженні структура рівня радіодоступу цієї мережі схожа на структуру рівня радіодоступу звичайних однорівневих мереж, а також не суттєво відрізняється значенням спектральної ефективності системи. Маючи велике значення навантаження, мережа має яскраво виражену багаторівневу структуру рівня радіодоступу та високу системну спектральну ефективність.

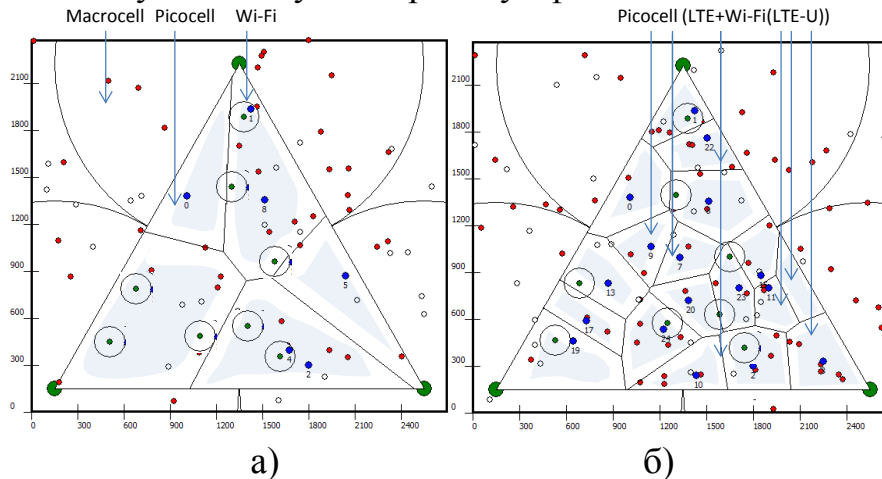


Рис. 9. Топологія модельованої інтегрованої мережі LTE / LTE-U / Wi-Fi в умовах низького навантаження – а) та високого навантаження – б)

Оцінюючи ефективність впровадження певного методу, слід використовувати критерій ефективності. Таким критерієм може бути ймовірність того, що абонент отримає певну пропускну здатність каналу. Для цього у роботі використано кумулятивну функцію розподілу (cumulative distribution function), CDF ймовірності середньої швидкості передавання для одного абонента в умовах різних варіантів формування структури рівня радіодоступу (рис. 10а).

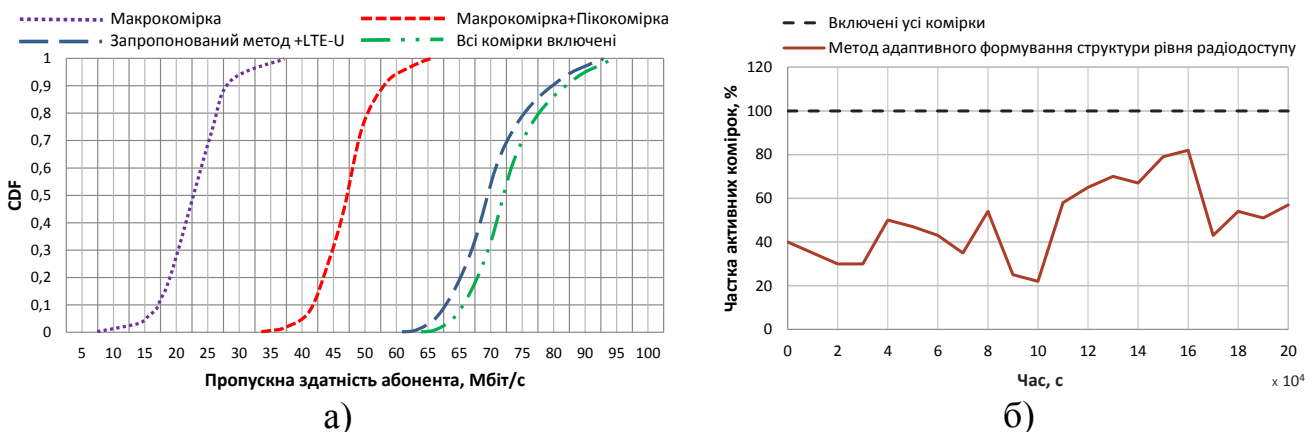


Рис. 10. Кумулятивна функція розподілу ймовірності середньої швидкості передавання для одного абонента при різних варіантах формування структури рівня радіодоступу – а) та графік середньої частки активних малих комірок – б)

З рис. 10а випливає, що якщо мережа складається лише з рівня макрокомірок, то в середньому один абонент може отримувати пропускну здатність від 20 до 25 Мбіт / с, при обслуговуванні макрокоміркою та пікокоміркою 45-50 мбіт/с. При обслуговуванні абонента в гетерогенній мережі з трьома рівнями базових станцій включаючи LTE-U використання неліцензійного діапазону Wi-Fi, середня пропускна здатність становить 67-71 Мбіт/с. Відповідно коли усі малі комірки активні, середня пропускна здатність становить 70-75 Мбіт/с. Порівнюючи результати, у випадку коли включені усі малі комірки і коли працює метод адаптивного формування структури рівня радіодоступу варто відзначити, що в другому випадку при зменшенні пропускну здатності на 1 - 4 % спостерігається вигреш в електроенергії на 30-42%. Внаслідок проведення 20 серій моделювання отримано графік середньої частки активних малих комірок (рис. 10б). Середня кількість активних малих комірок становить 58%, тому немає необхідності, щоб всі SC були активними протягом всього часу. Дана мережа з використанням алгоритму адаптивного формування структури рівня радіодоступу володіє значно кращими показниками по енергоефективності, що напрямиу впливає з середнього значення частки активних малих комірок.

В четвертому розділі роботи – «**Практична реалізація методу адаптивного формування структури рівня радіодоступу та технічні аспекти впровадження інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi в корпоративну інфраструктуру**» реалізовано метод адаптивного формування розміру комірки безпроводної мережі в корпоративній інфраструктурі НУ «Львівська політехніка» в залежності від навантаження та локалізації абонентського навантаження. Експеримент проводився в 11 корпусі НУ «Львівська політехніка» між точками доступу WAP-1 AP305r11k та WAP-2 AP302r11k, що знаходяться на 3 поверсі кафедри телекомунікації. Принцип роботи даного методу показано на рис. 11.

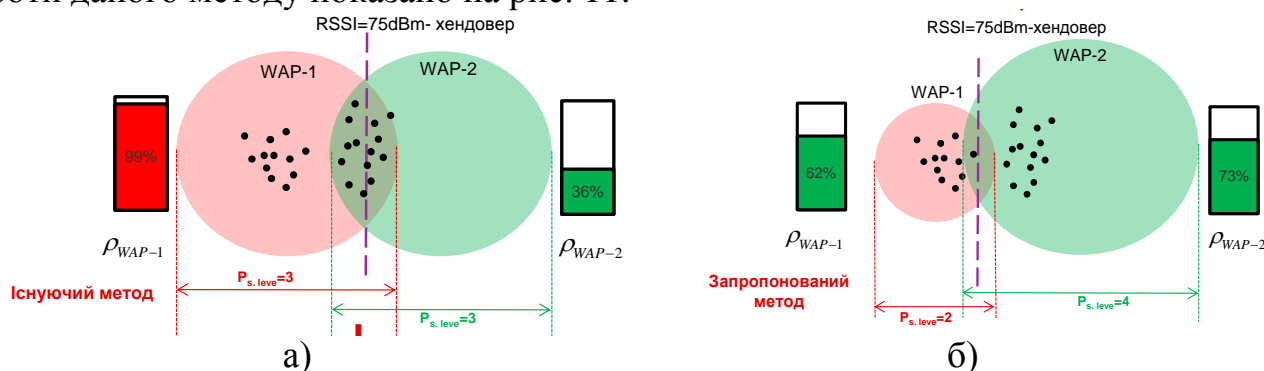


Рис. 11. Формування розміру комірки в залежності від навантаження та локалізації користувачького навантаження згідно існуючого методу – а) та згідно запропонованого методу адаптивного формування розміру комірки – б)

Для експерименту було залучено 26 студентів, локалізація місця знаходження яких показано на рис. 11. Всі студенти перебували на місці без зміни положення. Максимальна пропускна здатність кожної із точок доступу становить $R_{\max_WAP} = 10 \text{ мбіт/с}$. Кожен із студентів переглядав відео із сервісу YouTube із роздільною здатністю 360p, що вимагає пропускну здатності каналу 0,52 мбіт/с для однієї сесії. Таким чином, необхідна пропускна здатність каналу для користувачів WAP становить:

$$R_{\text{заг-}WAP} = \sum_{i=1}^n r_i, \quad (21)$$

де r_i – виділена пропускна здатність для i користувача, n – кількість активних користувачів в комірці Wi-Fi.

$$\text{Відповідно, } R_{\text{заг-}WAP-1} = \sum_{i=1}^{19} 0,52 = 9,88 \text{ мбіт} / \text{с}, R_{\text{заг-}WAP-2} = \sum_{i=1}^7 0,52 = 3,64 \text{ мбіт} / \text{с}.$$

Навантаження на WAP можна розрахувати як :

$$\rho_{WAP} = \sum_{i=1}^n r_i / R_{\text{max } WAP} = R_{\text{заг-}WAP} / R_{\text{max } WAP}, \quad (22)$$

Відповідно, $\rho_{WAP-1} = 9,88 / 10 \approx 0,99$ та $\rho_{WAP-2} = 3,64 / 10 \approx 0,36$. Отже, без використання запропонованого методу користувачі WAP-1 не мають змоги перегляду відео у кращій якості, оскільки зайнята уся пропускна здатність каналу. Підключення нових користувачів є також неможливим (рис. 11а). У цей самий час ресурсів пропускної здатності каналу WAP-2 використовуються лише на 36%. Проте, базуючись на критерію кращого рівня сигналу необхідного для реалізації хендвера, дана точка доступу не має змоги розвантажити точку доступу WAP-1. З використанням запропонованого методу контролер Wi-Fi автоматично прийме рішення про адаптацію розміру комірки в залежності від локалізації абонентського навантаження на основі ідентифікації по MAC-адресах кінцевих пристроїв та їх виміряних RSSI (Received Signal Strength Indication). Після застосування запропонованого методу відбулося балансування навантаження. Відповідно у комірці WAP-1 кількість активних користувачів згідно рис. 11б, становить $n=12$, що переглядають однотипний відеосервіс YouTube з розширенням 360р. Загальна використана пропускна здатність каналу становить $R_{\text{заг-}WAP-1} = \sum_{i=1}^{12} 0,52 = 6,24 \text{ мбіт} / \text{с}$. Аналогічно для WAP-2,

кількість користувачів $n=14$ загальна використана пропускна здатність каналу становить $R_{\text{заг-}WAP-2} = \sum_{i=1}^{14} 0,52 = 7,28 \text{ мбіт} / \text{с}$. Відповідно навантаження на комірці WAP-1 та WAP-2

дорівнює $\rho_{WAP-1} = 6,24 / 10 \approx 0,62$ та $\rho_{WAP-2} = 7,28 / 10 \approx 0,73$. Використання даного методу дає змогу користувачам точки доступу WAP-1 переглядати відео у кращій якості або підключати додаткових користувачів. Аналогічно для точки доступу WAP-2. Повсюдне використання запропонованого методу в централізованій Wi-Fi мережі в межах академічного містечка НУ “Львівська політехніка” дасть змогу забезпечити користувачам високошвидкісний доступ до інтернету, отримати сервіси кращої якості та підвищити доступність до мережі Wi-Fi в умовах високого навантаження.

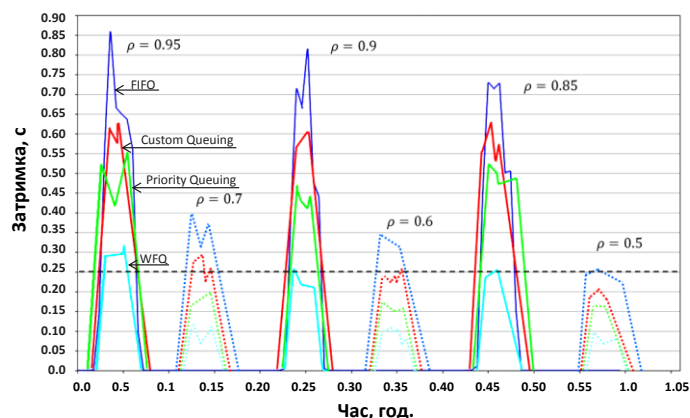


Рис. 12. Порівняння затримки обслуговування потоків реального часу в корпоративній мережі при конфігурації різних дисциплін обслуговування черг на мережевих пристроях в умовах різного навантаження

З допомогою середовища Opnet Modeler побудовано імітаційну модель інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi на прикладі реальної інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка”. В процесі моделювання досліджувались механізми обслуговування черг WFQ, Priority Queuing, Custom Queuing, FIFO. Черги формуються на точках доступу, контролері та маршрутизаторі мережі. Результати моделювання наведені на рис. 12. Як бачимо використання політики WFQ дає змогу зменшити затримки мультимедіа додатків реального часу в умовах високого

навантаження на інтегровану LTE/Wi-Fi мережу.

Таким чином, розроблена імітаційна модель інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi дає змогу спрогнозувати затримки обслуговування потоків реального часу в корпоративній мережі в умовах різного навантаження та вибрати оптимальні рішення щодо конфігурації мережевих пристроїв для забезпечення необхідного QoS.

Для дослідження ефективності удосконаленого алгоритму обслуговування черг канального рівня в мережі Wi-Fi для боротьби з короткочасними відмовами каналу в умовах передавання декількох відеопотоків реального часу проводиться серія експериментів, в яких точка доступу передає відеопотоки реального часу декільком отримувачам і в одного з них відбувається відмова каналу. Також розглядається адаптивний циклічний планувальник (Adaptive Round Robin scheduler, ARR), який є найкращим на сьогоднішній час для вирішення проблеми блокування черги при короткочасних відмовах каналу в безпроводній Wi-Fi мережі. Таким чином, в експериментах проводиться порівняння ефективності використання наступних дисциплін обслуговування черги: FIFO, ARR, PR.A-1 – пропонується модифікований алгоритм FIFO; PR.A-2 – пропонується алгоритм обслуговування черг із врахуванням допустимого часу очікування.

У роботі для оцінки якості відеозображення використано значення показника MSE (від англ. Mean Squared Error - середньоквадратична похибка), яка для двох кадрів (оригінального X і кінцевого Y розміром M × N пікселів кожен) вираховується як:

$$MSE_{XY} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\bar{X}(m,n) - \bar{Y}(m,n)|^2. \quad (23)$$

де $\bar{x}(i,j)$ - вектор, який характеризує піксель зображення X з координатами (i, j).

На рис. 13 наведено залежності значення показника MSE прийнятого відеозображення, обрахованої як сума значень MSE всіх його відеокadrів, від тривалості відмови каналу для «незадоволених якістю» і «задоволених якістю» отримувачів. Для кожної експериментальної точки проводилось по 50 запусків експерименту для отримання статистично достовірних даних.

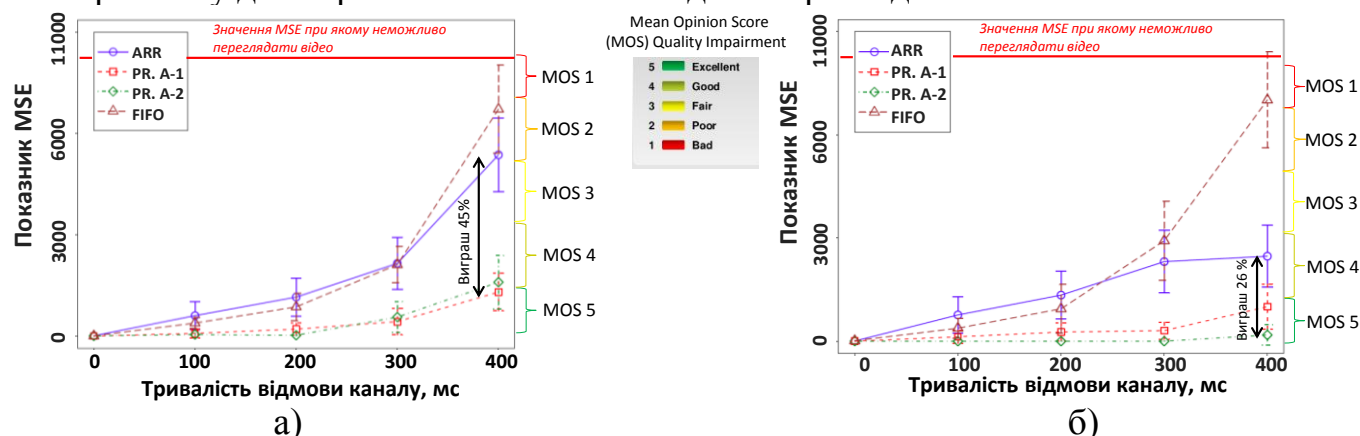


Рис. 13. Значення метрики MSE в залежності від тривалості відмови каналу для «незадоволених якістю» – а) та «задоволених якістю» отримувачів – б) при передаванні відеопотоків з використанням різних дисциплін обслуговування черг

Запропонований алгоритм обслуговування дав змогу в умовах інтеграцій технологій LTE/ Wi-Fi/LTE-U мережі запобігти блокуванню черги головним пакетом та покращити якість передавання відеопотоків від 5% до 45% оціненої за критерієм MSE в залежності від тривалості відмови каналу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих в дисертаційній роботі, становить розв'язок науково-технічного завдання підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi шляхом розроблення методів адаптивного управління доступом до неліцензійного частотного діапазону, планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу, а також удосконалення алгоритму обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для боротьби з короткочасними відмовами каналу в умовах передавання відеопотоків реального часу.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Встановлено, що невирішеними досі залишаються завдання адаптивного формування структури радіодоступу інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі в умовах наявності великої кількості абонентських пристроїв та координованого використання неліцензійного діапазону Wi-Fi операторами мобільного зв'язку для підвищення спектральної ефективності. Проаналізовано причини виникнення короткочасних відмов каналу при передаванні відеопотоків реального часу в мережах Wi-Fi. Проведений огляд існуючих рішень показав, що на сьогоднішній день не існує ефективного рішення, яке могло б успішно застосовуватись в реальному обладнанні на сучасних мережах.

2. Запропоновано концептуальну модель інтегрованої мобільної мережі наступного покоління на основі використання технологій LTE-U та Wi-Fi, яка базується на централізованому SDN контролері для реалізації адаптивного управління ресурсами мережі. Запропоновано метод адаптивного використання неліцензійного діапазону частот мережами Wi-Fi та LTE-U для забезпечення необхідної якості послуг. Даний метод на основі вимог QoS користувачів централізовано приймає обґрунтовані рішення щодо частки використання неліцензійного радіоресурсу оператором мобільного зв'язку LTE-U, що дало змогу підвищити спектральну ефективність в інтегрованих мережах LTE з уникненням міжсистемної інтерференції.

3. Досліджено процес передавання відеопотоків реального часу по мережі Wi-Fi з використанням методу випадкового доступу в умовах короткочасних відмов каналу для деяких із користувачів. Використання стандартної дисципліни обслуговування черги FIFO в умовах короткочасних відмов каналу призводить до виникнення проблеми блокування черги головним пакетом, в результаті чого погіршується якість надання відео послуг. Для вирішення цього у роботі удосконалено алгоритм обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi передавання даних, із забезпеченням необхідної якості, у каналах з короткочасними втратами зв'язку. Застосування даної дисципліни дає змогу уникнути зниження якості передавання відеопотоків отримувачам, для яких якість з'єднань не погіршувалась, а також зменшити зниження якості передавання відеопотоків отримувачам, для яких відбулась відмова каналу. Проведено оцінку ефективності модифікованого алгоритму обслуговування черги в умовах передавання відеопотоків реального часу. Результати експериментів показали те, що у порівнянні із існуючим адаптивним циклічним планувальником ARR запропонований алгоритм забезпечує кращу якість надання відео послуг реального часу від 5% до 45% оціненої за критерієм MSE.

4. У роботі запропоновано модель гетерогенної мережі з трьома рівнями базових станцій, які розміщуються згідно принципів детермінованої та стохастичної геометрії, що дає змогу відобразити реальну поведінку мережі радіодоступу в процесі впровадження малих комірок. Запропоновано метод адаптивного формування структури рівня радіодоступу, що здійснює управління малими комірками відповідно до поточного абонентського навантаження. Використання такого методу дає змогу збільшити пропускну здатність мережі і як наслідок якість обслуговування абонентів за рахунок більш рівномірного завантаження базових станцій. Для уникнення міжкоміркової інтерференції запропонований метод динамічно розподіляє загальну смугу частот між центральною та граничною зоною комірки LTE в залежності від локалізації абонентського навантаження та дає змогу підвищити ефективність використання ресурсів.

5. Розроблено алгоритм аналізу стану радіодоступу інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі для підвищення енергоефективності мережі. Для цього у роботі формалізовано критерії обслуговування абонентів базовими станціями кожного з рівнів залежно від поточних параметрів мобільності, пропускну здатності, послуги абонента для можливості переведення в енергозберігаючий режим роботи мережі. В умовах звичайного функціонування однієї базової станції енергоспоживання становить 14.7 Вт, а в енергозберігаючому режимі – 7 Вт, економія електроенергії становить 55%. Порівнюючи результати дослідження отримані в процесі конфігурації рівня радіодоступу інтегрованої мережі таким чином, що активні усі малі комірки, або коли працює метод адаптивного формування структури рівня радіо доступу, варто відзначити, що в другому випадку при зменшенні пропускну здатності на 1 - 4 % спостерігається вигравш в економії електроенергії на 30-42%.

6. Для оцінки ефективності запропонованих рішень побудовано імітаційну модель з набором інтегрованих між собою технологій радіодоступу LTE/Wi-Fi. Модель розроблено з використанням мови програмування C++ та LTE-A Downlink System Level Simulator. В результаті моделювання, встановлено, що якщо мережа складається лише з рівня макрокомірок, то в середньому один абонент може отримувати пропускну здатність від 20 до 25 Мбіт/с, при обслуговуванні макрокоміркою та пікокоміркою 45-50 мбіт/с, а при обслуговуванні абонента в гетерогенній мережі з трьома рівнями базових станцій включаючи LTE-U – використання неліцензійного діапазону Wi-Fi, середнє значення пропускну здатності становить 67 - 71 Мбіт/с, відповідно коли включені усі малі комірки середня пропускну здатність становить – 70-75 Мбіт/с.

7. Реалізовано метод адаптивного формування розміру комірки безпроводної мережі Wi-Fi в корпоративній інфраструктурі НУ “Львівська політехніка”, що дало змогу забезпечити користувачам високошвидкісний доступ до Інтернету та підвищити доступність до мережі Wi-Fi в умовах пікових навантажень на окремі групи комірок шляхом ефективного управління ресурсами мережі в залежності від фактичного сценарію функціонування та вимог окремих користувачів. Оцінено ефективність запропонованих рішень та досягнуто підвищення якості обслуговування за критерієм пропускну здатності точки доступу на 36%. Розроблено імітаційну модель інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi на базі інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка” в середовищі Opnet Modeler, яка дає змогу спрогнозувати затримки обслуговування потоків реального часу в корпоративній мережі в умовах різного навантаження та вибрати оптимальні рішення мережевої конфігурації для забезпечення необхідного QoS.

ОСНОВНІ РОБОТИ, ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України та наукових періодичних виданнях інших держав, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

1. Beshley M., Klymash M., Strykhalyuk B., Shpur O., Bugil B., Kagalo I. (2015). SOA quality management subsystem on the basis of load balancing method using fuzzy sets. International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSSE), Volume 4, Issue 1, P.10-21. (Directory of Open Access Journals (DOAJ) - Computer Science, Google Scholar, CiteSeerX, JournalTOCs, iSEEK та ін.))

2. Strykhalyuk B., Kahalo I., Brych M., Beshley M., Seliuchenko M. (2014). Implementation of wireless heterogeneous network based on LTE core virtualization for military communication systems. Системи озброєння і військова техніка: наук. журнал / X: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба, №4(40), С. 125-132. (Index Copernicus, Google Scholar)

3. Кагало І.О., Бешлей М.І., Климаш М.М., Панченко О.М., Бешлей Г.В. Адаптивне формування багаторівневої радіоструктури інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi (2019) “Телекомунікаційні та інформаційні технології”, №3(64) – С. 24–38. (Google Scholar)

4. Масюк А. Р., Стрихалюк І. Б., Брич М. В., Кагало І. О., Бешлей Г.В. (2017). Алгоритм інтелектуального вертикального хендоверу в гетерогенній мобільній мережі на основі хмарних обчислень. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації, № 874, С. 110–121. (Index Copernicus)

5. Климаш М. М., Кирик М. І., Плєсканка Н. М., Кагало І. О. (2014). Багаторівнева модель буферизації даних у вузлах обслуговування мультисервісного трафіку. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації, № 796, С. 182-194. (Index Copernicus)

6. Климаш М. М., Лаврів О. А., Кагало І. О., Коваль Б. В., Максимюк Т. А. (2011). Покращення параметрів радіоінтерфейсу LTE/HSPA. Комп'ютерні технології друкарства, №. 26, С. 130–137.

Публікації у матеріалах конференцій, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

7. V. Romanchuk, T. Andrukhiv and I. Kahalo. (2012). The main causes of failures SQL Server. Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, Lviv-Slavske, Ukraine, 2012, pp. 376-376.(Scopus)

8. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko, O. Zyuzko and I. Kahalo. (2018). Experimental performance analysis of software-defined network switch and controller. 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 282-286. (Scopus)

9. P. Huskov, T. Maksymyuk, I. Kahalo and M. Klymash. (2015). Smart backhauling subsystem for 5G heterogeneous network. The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, Lviv, Ukraine, 2015, pp. 481-483. (Scopus)

10. Halyna Beshley, Mykhailo Klymash, Mykola Beshley and Ihor Kahalo. (2019). Improving the Efficiency of LTE Spectral Resources Use by Introducing the new of M2M/IoT Multi-Service Gateway. The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, Lviv, 2019, pp. 114-117. (Scopus)

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

12. I. Kahalo, H. Beshley, M. Beshley and O. Panchenko. (2019). Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, 2019, pp. 1167-1170. (Scopus)

Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:

13. Климаш М.М., Бешлей М.І., Кагало І.О., Готра Л.М. (2014). Вдосконалення методів та алгоритмів управління інформаційними потоками в конвергентних телекомунікаційних мережах. Матеріали 4-ї Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 25-річчю заснування кафедри "Радіотехніки та інформаційні безпеки" Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича, 23-25 жовтня 2014, м. Чернівці, Україна, с.106-107.

14. Бугиль Б.А., Кагало І.О. (2011). Підвищення ефективності маршрутизації інформаційних потоків на основі оптимального розподілу мережевих ресурсів. Матеріали V міжнародної наукової конференції молодих вчених "Комп'ютерні науки та інженерія 2011", 24–26 листопада 2011 р., м. Львів, Україна, С. 304-305.

15. Lavriv O., Kahalo I., and Kolodiy R. (2015). Application of NoSQL approach in data-centered network architectures: big data case, 2015 1st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT'2015), Lviv, Ukraine, pp. 103–105.

АНОТАЦІЯ

Кагало І. О. Підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. Львів, 2018.

В дисертаційній роботі розв'язано науково-технічне завдання підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi шляхом розроблення методів адаптивного управління доступом до неліцензійного частотного діапазону, планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу, а також удосконалення алгоритму обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для передавання даних, із забезпеченням необхідної якості, у каналах з короткочасними втратами зв'язку. Вперше запропоновано метод адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi, на основі діаграми Вороного в залежності від локалізації абонентського навантаження, що дало змогу уникнути міжкоміркової інтерференції, підвищити якість обслуговування та енергоефективність мережі до 42%. Удосконалено метод адаптивного управління доступом до неліцензійного радіоканалу в умовах спільного співіснування систем Wi-Fi та LTE-U, що дало змогу підвищити ефективність використання ресурсів та швидкість передавання даних в мережах LTE з уникненням міжсистемної інтерференції. Запропоновано алгоритм обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для забезпечення необхідної якості, у каналах з короткочасними втратами зв'язку при передаванні

декількох відеопотоків реального часу, що дало змогу в інтегрованій LTE/Wi-Fi мережі запобігти блокуванню черги головним пакетом та покращити якість передавання відеопотоків від 5% до 45% оціненої за критерієм MSE. На основі розробленої імітаційної моделі оцінено ефективність запропонованих рішень. В результаті моделювання встановлено, що комплексне використання модифікованого методу повторного розподілення частот між комірками LTE в умовах адаптивного формування структури радіодоступу та неліцензійного діапазону частот, дало змогу підвищити на 25 % швидкість передавання даних для абонентів інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі з уникненням міжкоміркової інтерференції.

Ключові слова: інтегрована мережа, локалізація абонентського навантаження, LTE, LTE-U, W-Fi, пропускна здатність мережі, якість сервісу.

АННОТАЦИЯ

Кагало І. О. Повышение энергоэффективности и качества обслуживания интегрированных сетей LTE / Wi-Fi. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Национальный университет “Львівська політехніка” Министерства образования и науки Украины, г. Львов, 2019.

В диссертационной работе решена научно-техническая задача повышения энергоэффективности и качества обслуживания интегрированных сетей LTE / Wi-Fi путем разработки методов адаптивного управления доступом к нелицензионному частотному диапазону, планирования радиоресурсов и формирования структуры уровня радиодоступа, а также совершенствования алгоритма обслуживания очереди канального уровня в сети Wi-Fi для передачи данных, с обеспечением необходимого качества, в каналах с кратковременными потерями связи. Впервые предложен метод адаптивного планирования радиоресурсов и формирования структуры уровня радиодоступа интегрированных сетей LTE / Wi-Fi, на основе диаграммы Вороного в зависимости от локализации абонентской нагрузки, что позволило избежать интерференции, повысить качество обслуживания и энергоэффективность сети до 42%. Усовершенствован метод адаптивного управления доступом к нелицензионному радиоканалу в условиях совместного сосуществования систем Wi-Fi и LTE-U, что позволило повысить эффективность использования ресурсов и скорость передачи данных в сетях LTE с предотвращением межсистемной интерференции. Предложен алгоритм обслуживания очереди канального уровня в сети Wi-Fi для обеспечения необходимого качества, в каналах с кратковременными потерями связи в условиях передаче нескольких видеопотоков реального времени, что позволило в интегрированной LTE / Wi-Fi сети предотвратить блокирование очереди главным пакетом и улучшить качество передачи видеопотоков от 5% до 45 %, оцененное по критерию MSE. На основе разработанной имитационной модели оценена эффективность предложенных решений. В результате моделирования установлено, что комплексное использование модифицированного метода повторного распределения частот между сотами LTE в условиях адаптивного формирования структуры радиодоступа и нелицензионного диапазона частот, позволило повысить на 25% скорость передачи данных для абонентов интегрированной LTE / Wi-Fi сети с улучшенными показателями интерференции.

Ключевые слова: интегрированная сеть, локализация абонентской нагрузки, LTE, LTE-U, W-Fi, пропускная способность сети, качество сервиса.

ABSTRACT

Kahalo I. O. Improving the energy efficiency and the quality of service in the integrated LTE/Wi-Fi networks. – As a manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the Ph. D. degree in technical sciences on specialty 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – Lviv Polytechnic National University of the Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The thesis is devoted to solving the scientific and technical task of improving the energy efficiency and the quality of service in the integrated LTE/Wi-Fi networks by developing the method of adaptive unlicensed spectrum access, the method of radio resource planning and network structure design, as well as improving the algorithm of the link level queueing in the Wi-Fi network in order to tolerate short-term link failures during the transmission of the real-time video streams. In particular, the method of adaptive radio resources planning and integrated LTE/Wi-Fi network structure design based on the Voronoi diagram is proposed first time. The proposed method takes into account the spatial localization of the users that allows improving the service quality and the energy efficiency of the network up to 40%, by avoiding interference. The method of adaptive unlicensed spectrum access for the scenario of the Wi-Fi/LTE-U coexistence has been further improved to increase the radio resource utilization and the data rate in the LTE network by preventing the inter-system interference. The algorithm of link level queueing in the Wi-Fi network is developed to tolerate the short-term link failures during the transmission of multiple real-time video streams. The developed algorithm allows improving the quality of real-time video streaming over the integrated LTE/Wi-Fi network by 5-45% according to the MSE metric. The efficiency of the all aforementioned solutions has been evaluated using the developed simulation model. According to the simulation results, it was proven that the combination of the proposed method for frequency reuse among LTE cells, adaptive network structure design and the unlicensed spectrum utilization allowed to increase data rates for subscribers of integrated LTE/Wi-Fi network by 25% while mitigating the inter-system interference between Wi-Fi and LTE.

Key words: integrated network, user localization, LTE, LTE-U, W-Fi, network bandwidth, quality of service.

Підписано до друку 09.06.2020р. Папір офсетний. Друк на різогр.
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0,9. Наклад 130 прим. Зам. №321

Друк СПДФО Марусич М.М. Свідоцтво №1252 від 30.12.1996

м. Львів, пл. Осмомисла, 5/11

тел./факс (032) 261-51-31.

email: interprint-m@ukr.net