

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

БРИЧ МИКОЛА ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.396



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

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - доктор технічних наук, доцент
Стрихалюк Богдан Михайлович, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри телекомунікацій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Коляденко Юлія Юрївна
Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інфокомунікаційної інженерії;
кандидат технічних наук, доцент
Макаренко Анатолій Олександрович
Державний університет телекомунікацій, доцент кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій.

Захист дисертації відбудеться "2" липня 2018 р. о 15:30 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, Львів-13, 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 "31" травня 2018 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради



І.В. Демидов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стрімкий розвиток технологій спричиняє зростання обчислювальних потужностей кінцевих пристроїв абонентського доступу, стимулюючи, таким чином, появу нових видів послуг у мережах мобільного зв'язку, які не були можливими раніше. Наслідком цього є зростання вимог до пропускної здатності цих мереж. Тому, розвиток мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого поколінь є важливим завданням в Україні та світі. Особливості розподілу радіочастотного ресурсу між різними провайдерами мобільного зв'язку та безпроводними радіорелейними системами військового призначення в Україні призвели до нестачі вільних частотних ресурсів, потрібних для ефективного впровадження мереж стандарту LTE в масштабах держави. Таким чином, постає завдання пошуку нових методів розгортання мереж LTE, в тому числі - у неліцензійних частотних діапазонах, а також розроблення адаптивних методів управління ними, які б забезпечили належне функціонування мереж LTE в умовах нестачі радіочастотного ресурсу. Зокрема, в останні роки активно ведуться дослідження за напрямком розроблення 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 малими комірками поверх існуючого покриття макрокомірки. Таким чином, концепція гетерогенних мереж частково розв'язує завдання підвищення пропускної здатності мережі в умовах обмежених частотних ресурсів за рахунок збільшення відношення сумарної доступної частотної смуги на одиницю площі покриття. Тому гетерогенні мережі розглядаються як один з існуючих елементів для переходу до мереж мобільного зв'язку 5G.

Проблематика підвищення ефективності гетерогенних 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, В. Г. Сайко, С.В. Гаркуша, M. Jo, X. Ge, L. Hanzo, M. Dohler, M. Naenggi, та багатьма іншими.

Незважаючи на велику кількість різноманітних рішень для підвищення ефективності гетерогенних мереж мобільного зв'язку, досі нерозв'язаними залишаються завдання адаптивного використання радіочастотних ресурсів, в умовах існування великої кількості конкуруючих технологій радіодоступу, координованого використання радіочастотних ресурсів операторами зв'язку, а також завдання 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 розв'язання науково-практичне 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 і 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 рр.), № 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 рр.), № держреєстрації 0117U007177, які виконувались за участі здобувача в Національному університеті «Львівська політехніка».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення пропускну здатності гетерогенних мереж мобільного зв'язку в умовах адаптивного використання радіочастотного ресурсу кількома операторами зв'язку та застосування різних технологій 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 до радіосередовища групою абонентів 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 електрозв'язку, теорії ймовірності та математичної статистики, теорію ігор, методи аналітичного та імітаційного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. 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 дало змогу підвищити ефективність використання ресурсів в умовах одночасного функціонування мереж LTE різних операторів у неліцензійному частотному діапазоні.

2. 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.

3. Набув подальшого розвитку 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.

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.

4. Запропоновано імітаційну модель просторового аналізу активності абонентів у гетерогенній мережі мобільного зв'язку, яка дає змогу досягти підвищення ефективності використання радіочастотних ресурсів на 30% та знизити обчислювальну складність алгоритму резервування ресурсів.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, подані у дисертації одержані здобувачем особисто. У працях опублікованих у співавторстві авторові 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 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), ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (м. Беппу, Японія, 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 у повному обсязі обговорені на засіданнях та семінарах кафедри телекомунікацій.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових праць, серед них: статей у наукових 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 2 додатків. 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено базові концепції дисертаційної роботи. Розкрито суть і стан наукового завдання, обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету та окремі завдання дослідження, наукову новизну, практичну цінність. Наведено дані про результати роботи, їх практичне значення, апробацію цих результатів на наукових конференціях.

В першому розділі дисертації – «Аналіз тенденцій розвитку гетерогенних мереж мобільного зв'язку та вимог до їх пропускну здатності» – проведено огляд літературних джерел за темою дисертації для визначення вимог до сучасних та перспективних мереж мобільного зв'язку. На підставі аналізу останніх релевантних робіт та існуючих концепцій розвитку мереж мобільного зв'язку встановлено, що стандарти п'ятого покоління поставлені перед вимогою значного підвищення пропускну здатності, у порівнянні з існуючими мережами LTE. 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. 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 пропускну здатності мережі до 5 разів. Збільшення

доступної смуги радіочастотних ресурсів дає змогу збільшити сумарну пропускну здатність мережі мобільного зв'язку до 25 разів. Основний потенціал щодо нарощування пропускну 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 абонентів, що обслуговуються без збільшення сумарної смуги радіочастот. Крім того, проведено аналіз поточної ситуації із розподілом та ліцензуванням радіочастотних діапазонів, згідно із чинним законодавством. Визначено, що основною перешкодою для впровадження мереж LTE в Україні є неефективно фрагментовані ліцензійні смуги радіочастот, що призвело до проблем вже при впровадженні мереж 3G. Для зниження завантаженості ліцензійних частотних діапазонів у роботі пропонується використання альтернативних частотних діапазонів, які не потребують ліцензування. Визначено, що найоптимальнішим для мереж LTE в Україні є неліцензійний діапазон 5170-5850 МГц. В рамках проблематики, що розглядається у даній дисертаційній роботі виділено сукупність першочергових взаємопов'язаних завдань, розв'язання яких у комплексі дасть змогу досягти підвищення пропускну здатності гетерогенних мереж мобільного зв'язку в умовах адаптивного використання радіочастотного ресурсу кількома операторами зв'язку та технологіями радіодоступу.

Другий розділ роботи – **«Методи та моделі адаптивного використання радіочастотних ресурсів в гетерогенних мережах мобільного зв'язку»** – присвячено дослідженню процесу адаптивного використання радіочастотних ресурсів у гетерогенних мережах мобільного зв'язку. 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, то передавальний вузол очікує, доки канал буде звільнений і, після випадково обраного інтервалу очікування, здійснює свою спробу передавання даних. Якщо дана спроба є успішною, то вузол повинен отримати підтвердження від вузла отримувача (АСК). Якщо підтвердження не отримується, то передавальний вузол вважає, що дані були втрачені та здійснює повторну спробу передавання даних. Таким чином, мережі Wi-Fi можуть ефективно функціонувати в умовах наявності великої кількості конкуруючих вузлів у спільному частотному діапазоні. 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. Ці підкадри

чергуються між собою для забезпечення адаптивного використання радіочастотних ресурсів абонентами LTE, із дотриманням 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 (рис. 1). Кожен пристрій LTE прослуховує середовище протягом першого підкадру та здійснює передавання протягом усіх наступних підкадрів за умови, що канал є вільним. Якщо канал є зайнятим протягом першого підкадру, то 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, то вона займає канал аж до завершення основного кадру, після чого звільняє його для того, щоб надати можливість точкам доступу Wi-Fi реалізувати рівноцінне право адаптивного використання радіочастотних ресурсів.

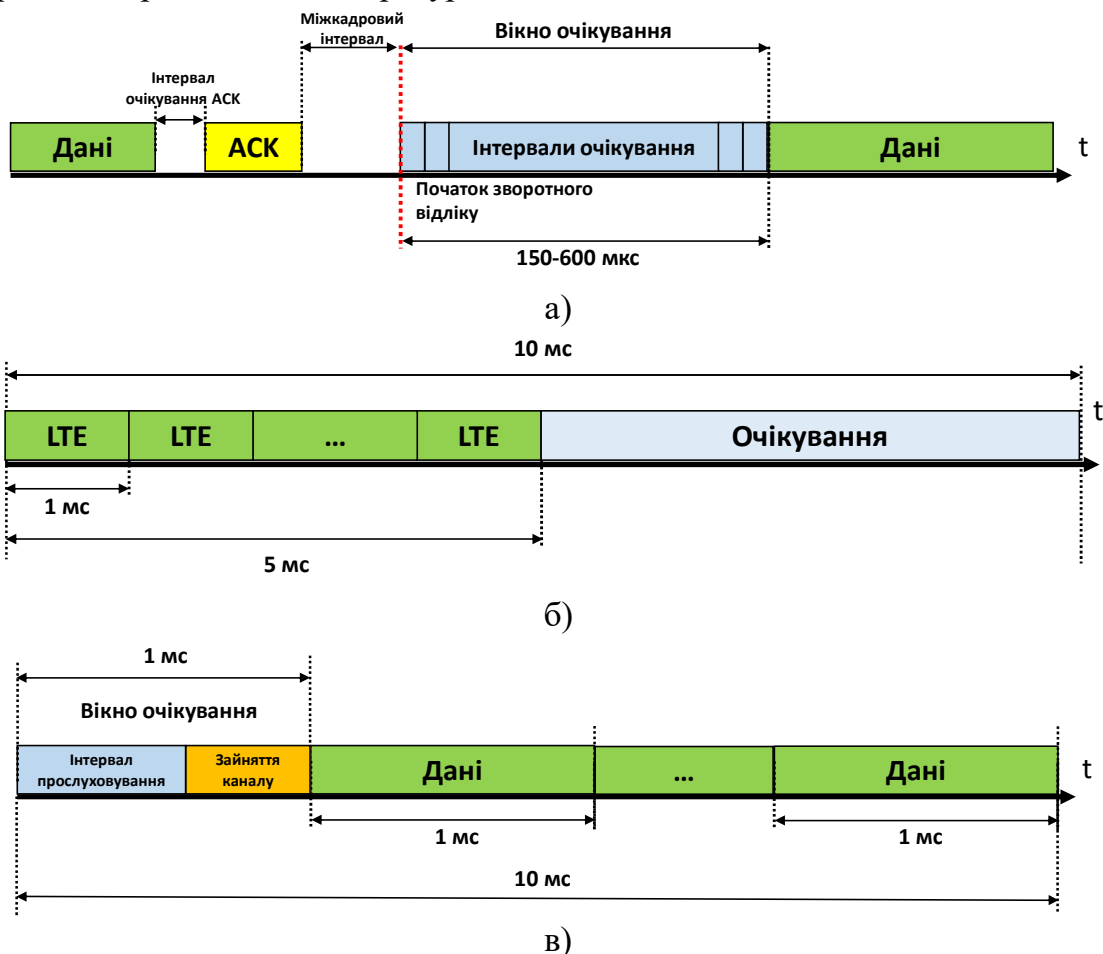


Рис. 1. Порівняння існуючого методу випадкового доступу у мережах Wi-Fi – а), існуючого методу доступу в мережах LTE – б) та запропонованого методу випадкового доступу в мережі LTE – в).

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 розв'язання даної проблеми у роботі запропоновано модель спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону, яка враховує поточні потреби операторів у додаткових радіочастотних ресурсах.

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

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

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

Початково, значення вектора Шеплі встановлюються однаковими для усіх операторів:

$$\psi_k = \frac{1}{M}, \quad \forall k. \quad (2)$$

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

$$\omega_k = W \psi_k, \quad \forall k. \quad (3)$$

Індивідуальний виграш кожного оператора розраховується наступним чином:

$$U_k = \frac{1}{C_k} \sum_i R_i u_i, \quad i \in \{1, n_k\}, \quad k \in \{1, 2, 3\}, \quad u_i \in \{0, 1\}, \quad (4)$$

де C_k – максимальна можлива пропускна здатність для заданої частотної смуги ω_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 вектора Шеплі на основі виразу (1). Далі, весь цикл повторюється знову.

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. 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. 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. Схематична модель розподілу ресурсів та блок-схему алгоритму агрегації радіочастотних ресурсів, представлено на рис. 2.

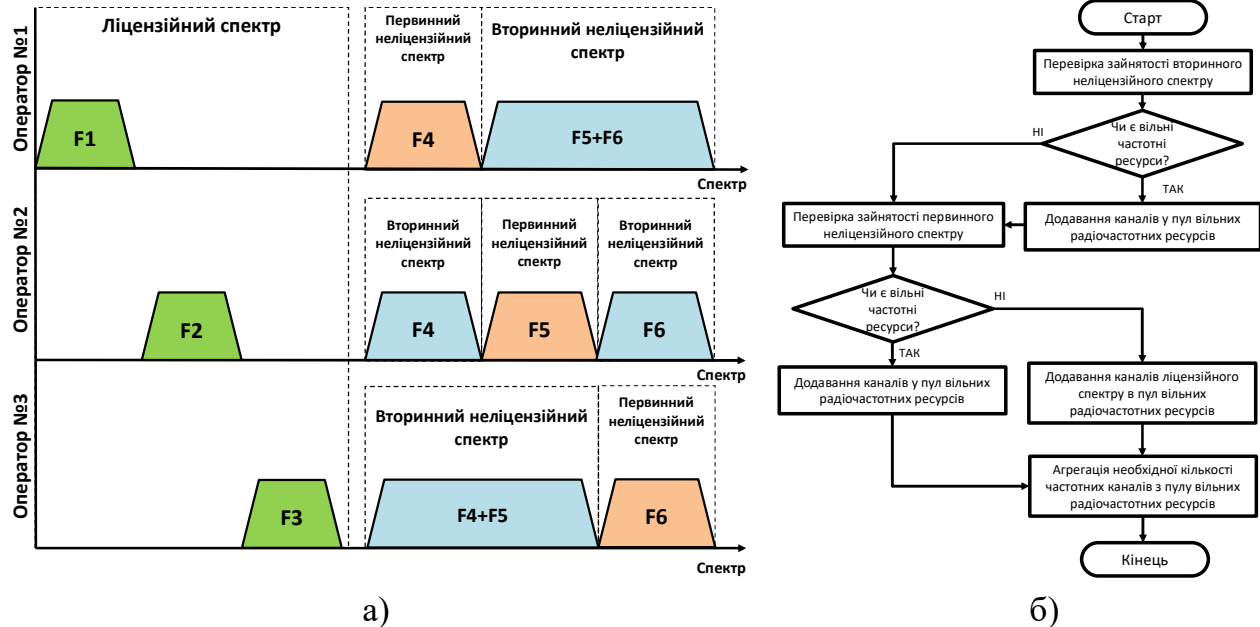


Рис. 2. Запропонована модель розподілу радіочастотних ресурсів – а) та блок-схема розробленого алгоритму адаптивної агрегації радіочастотних ресурсів ліцензійного та неліцензійного діапазону – б).

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. Таким чином, виділяють два базові методи зниження ймовірності виникнення 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.

В дисертації 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 автором 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. 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. Оскільки ймовірність виникнення колізій залежить від співвідношення між розміром часового вікна та кількістю конкуруючих вузлів, то 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 цієї групи. Тому, вибір кількості груп та їх розміру залежить від підходу до 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. Порівняння класичного методу випадкового доступу із запропонованим координованим методом представлено на рис. 3.

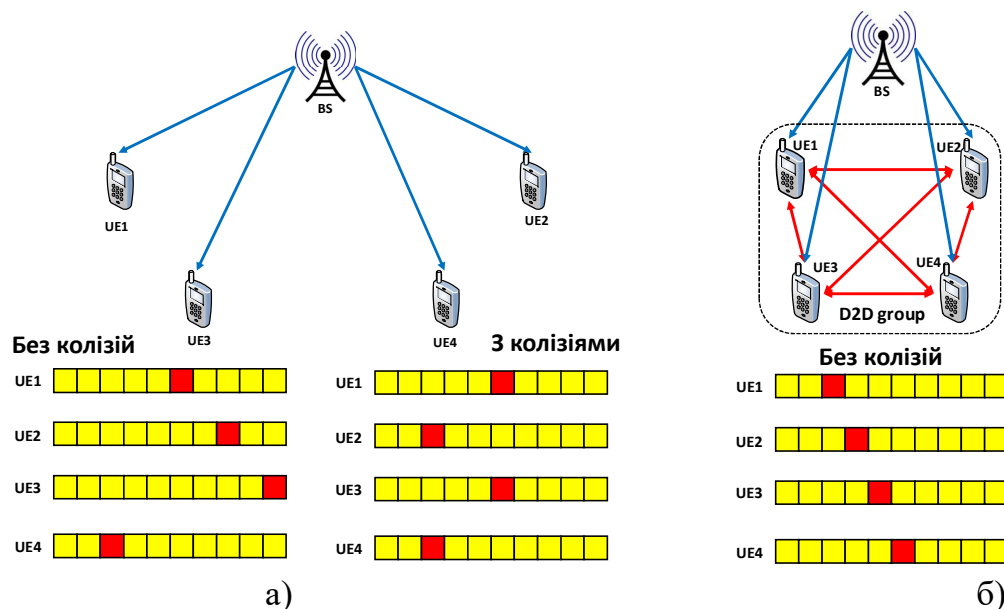


Рис. 3. Порівняння традиційного методу випадкового доступу – а) із запропонованим методом координованого випадкового доступу – б).

У третьому розділі дисертації – «Моделювання та дослідження показників ефективності використання радіочастотних ресурсів у гетерогенних мережах мобільного зв'язку» – 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. Отримано результати співвідношення потужності сигналу до сумарного значення шуму та інтерференційних завад (SINR) в приймальних абонентських пристроях (рис. 4).

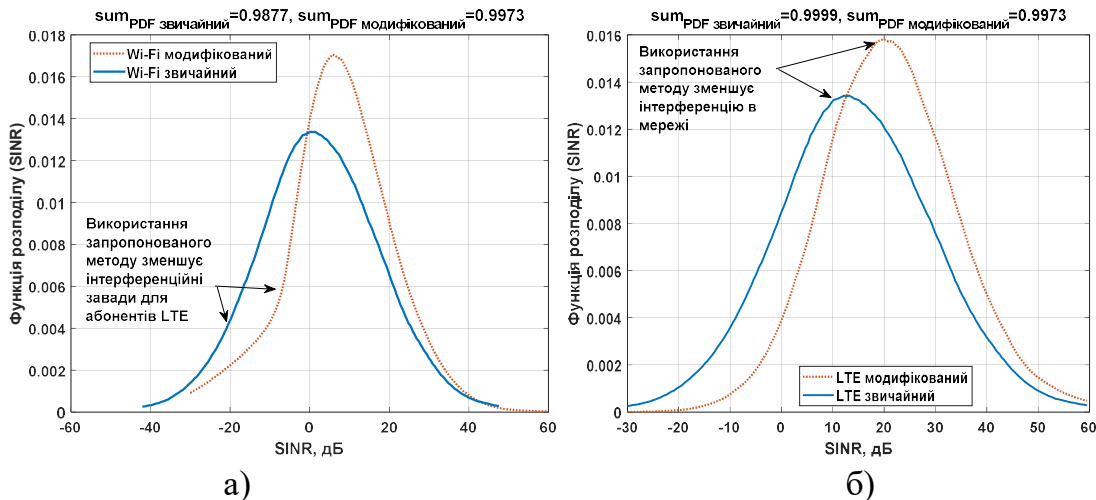


Рис. 4. Результати порівняння густини розподілу ймовірностей значень SINR при традиційному та удосконаленому методах випадкового доступу для користувачів Wi-Fi – а) та користувачів LTE – б).

Отримані результати показали перевагу запропонованого методу точки зору інтерференційних завад між мережами Wi-Fi та LTE. Як можна побачити із результатів на рис. 4.а та рис. 4.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. Це досягається шляхом адаптації інтервалів прослуховування середовища до структури кадру LTE. Спочатку передавальна станція LTE прослуховує середовище протягом інтервалу, кратного 1 мс, що відповідає стандартному підкадру LTE. Якщо протягом одного з підкадрів канал звільняється, то 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.

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 згідно (1)-(4). Результати моделювання представлені на рис. 5.

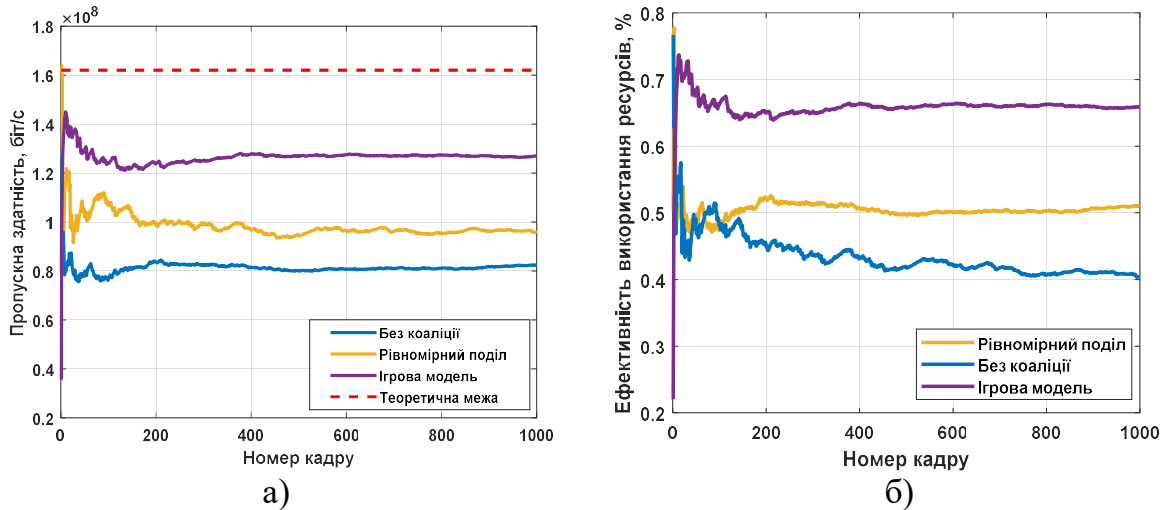


Рис. 5. Результати моделювання пропускної здатності мережі LTE-U – а) та ефективності використання радіочастотних ресурсів – б) при застосуванні ігрової моделі спільного використання радіочастотних ресурсів.

Для дослідження ефективності функціонування запропонованого методу випадкового доступу з координуваним 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. На рис. 6. представлено результати порівняння ймовірності виникнення колізій в мережі для випадків незалежного прослуховування та для випадку координованого прослуховування середовища 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. 6.а), і до 10 разів, для випадку груп з чотирьох абонентів (рис. 6.б). Подальше зростання розміру D2D груп дає змогу повністю уникнути колізій, проте такий підхід призводить до суттєвого зростання затримки доступу для всіх абонентів.

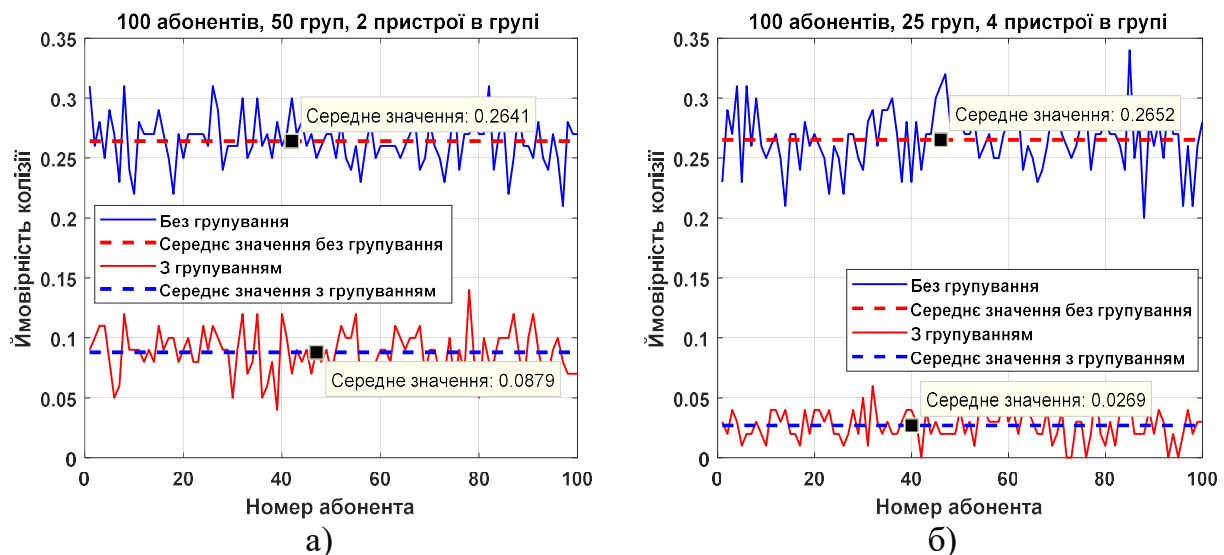


Рис. 6. Порівняння ймовірності виникнення колізій для існуючого та запропонованого методів доступу при 2 абонентах в D2D групі - а) та при 4 абонентах в D2D групі -б).

Четвертий розділ роботи – «Практична реалізація гетерогенної мережі мобільного зв'язку з програмним управлінням радіочастотними ресурсами» – 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 (рис. 7).

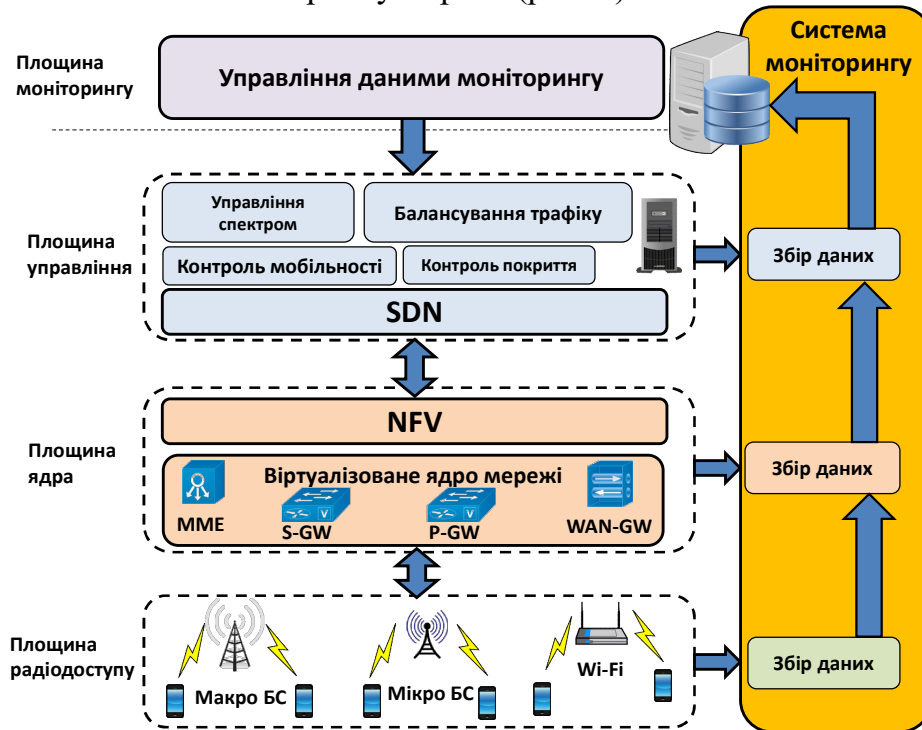


Рис. 7. Архітектура гетерогенної мережі мобільного зв'язку з програмним управлінням згідно концепції SDN.

Загальна архітектура запропонованої системи (рис. 7) складається з чотирьох площин: площина радіодоступу, площина ядра, площина управління і площина моніторингу. Площина радіодоступу відповідає за безпроводну інфраструктуру доступу кінцевих користувачів. Площина ядра забезпечує функції контролю якості, білінгу та мобільності. Всі функціональні елементи мережного ядра віртуалізуються за допомогою технології NFV (Network Function Virtualization). Площина контролю складається з контролера (або декількох контролерів) SDN, який відповідає за управління використанням спектру, балансування навантаження, маршрутизацію трафіку, управління мобільністю та планування покриття, застосовуючи наявні дані моніторингу мережі. В роботі запропоновано додаткову платформу, яка відповідає за формування інформації, використовуючи контекстно-орієнтовану аналітику.

Даний підхід використовує кінцеві абонентські пристрої для збору важливої інформації про стан мережі у різних зонах та у різні моменти часу. Система моніторингу розроблена таким чином, що дозволяє збирати будь-який тип даних у хмарній базі даних, як у текстовій, так і в числовій формі. Перевагою

запропонованої системи моніторингу є невеликий розмір переданих блоків даних (менше 1 Кб), що не створює значного надлишку трафіку. Відповідно, навіть невеликий обсяг переданих даних дає змогу отримати значну інформацію щодо поточних умов функціонування мережі. Ця функція відкриває великі можливості для операторів налаштовувати систему моніторингу відповідно до їх вимог у цільовій області розгортання. Уся статистика зберігається у базі даних, зокрема дані сканування спектру, навантаження, пропускна здатність, локалізація абонентів та передавальних станцій, а також багато інших параметрів мережі. 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. 8. Приведено функціональну архітектуру моделі спільного використання радіочастотних ресурсів для централізованого обчислення виразів (1)-(4) із застосуванням технології SDN.

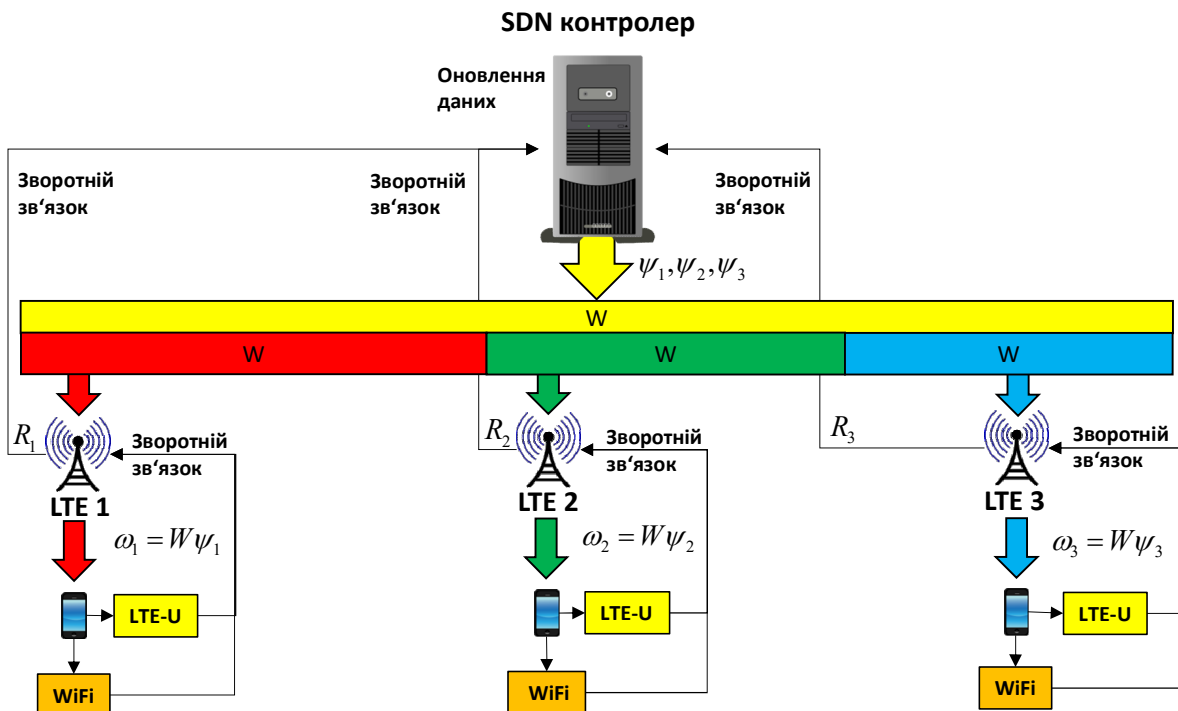


Рис. 8. Практична реалізація розробленої моделі спільного використання радіочастотних ресурсів на основі застосування технології SDN.

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 і вимог до параметрів якості передавання даних, на підставі чого зроблено такі висновки.

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. Розв'язання поставлених завдань створює фундаментальні засади для подальшої еволюції мереж мобільного зв'язку LTE до технологій 5G та парадигми Інтернету речей.

2. Розв'язано завдання 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 спільного використання ліцензійних та неліцензійних радіочастотних ресурсів.

3. Розв'язано завдання 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 пропускній 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 ресурсів розроблено алгоритм адаптивної агрегації радіочастот ліцензійного та неліцензійного діапазонів, який використовує логічне розділення радіочастотного ресурсу за трьома пріоритетами доступу оператора, що дає змогу вдвічі підвищити пікову пропускну здатність для абонентів гетерогенної мережі мобільного зв'язку.

4. 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 цього методу розроблено алгоритм адаптивного вибору часового вікна доступу, 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 виконує 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 імітаційне 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 в роботі ігрової моделі розподілу радіочастотних ресурсів. Як показують результати, запропонована модель дає змогу підвищити ефективність використання радіочастотних ресурсів на 30% при розподіленому варіанті управління радіочастотними ресурсами і на 50% при централізованому варіанті управління 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 на основі кількох 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:

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.

Статті у журналах, що входять до переліку наукових фахових видань України:

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.

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

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.

Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:

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.

АНОТАЦІЯ

Брич М.В. Моделі та алгоритми функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку. – 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.

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. Проведено аналіз поточного стану та тенденцій розвитку мереж мобільного зв'язку за напрямком стандартів п'ятого покоління. Визначено основні обмежуючі фактори для підвищення пропускної здатності мереж мобільного зв'язку, такі як обмеження радіочастотного ресурсу, проблематику розподілу спектру та ліцензування технологій радіозв'язку в Україні, відсутність єдиної площини управління гетерогенною мережною інфраструктурою. 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. 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 радіочастотних ресурсів в умовах одночасного функціонування мереж LTE різних операторів у неліцензійному частотному діапазоні. 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. Проведено моделювання процесу функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку в ліцензійному частотному діапазоні.

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

АННОТАЦИЯ

Брыч М.В. Модели и алгоритмы функционирования гетерогенных сетей мобильной связи. – 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, 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи разработки моделей и алгоритмов адаптивного использования радиочастотных ресурсов лицензионного и нелицензионного диапазонов в сетях мобильной связи при наличии нескольких конкурирующих операторов связи и высокой гетерогенности технологий радиодоступа, типов устройств и требований к параметрам качества передачи данных. Проведен анализ текущего состояния и тенденций развития сетей мобильной связи в направлении стандартов пятого поколения. Определены основные ограничивающие факторы для повышения пропускной способности сетей мобильной связи, такие как ограничение радиочастотного ресурса, проблематика распределения спектра и лицензирования технологий радиосвязи в Украине, отсутствие единой плоскости управления гетерогенной сетевой инфраструктурой. Получил дальнейшее развитие метод случайного доступа с прослушиванием среды путем его адаптации к структуре кадра LTE на канальном уровне, что позволило повысить суммарную пропускную способность гетерогенной сети мобильной связи за счет адаптивного использования нелицензионных радиочастотных ресурсов. Впервые предложена модель совместного использования радиочастотных ресурсов несколькими операторами мобильной связи на основе теории игр, которая, в отличие от существующих, учитывает текущие потребности оператора в пропускной способности, что позволяет повысить эффективность использования ресурсов в условиях одновременного функционирования сетей LTE различных операторов в нелицензионном частотном диапазоне. Впервые предложен метод случайного доступа с координированным прослушиванием среды абонентами LTE, который, в отличие от известных, группирует абонентов в D2D кластеры, что позволяет снизить уровень интерференционных помех в гетерогенной сети мобильной связи за счет уменьшения количества коллизий между абонентами LTE в нелицензионном частотном диапазоне. Проведено моделирование процесса функционирования гетерогенной сети мобильной связи в лицензионном частотном диапазоне.

Ключевые слова: гетерогенные сети мобильной связи, адаптивное использование ресурсов, 5G, программно-управляемые сети мобильной связи.

ABSTRACT

Brych M.V. Models and algorithms of heterogeneous mobile networks operation. – On the rights of the 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, 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. 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. To alleviate these above mentioned issues, several solutions to improve the future 5G mobile network infrastructure have been proposed. 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. In addition, a new model for the unlicensed spectrum sharing by several mobile network operators has been proposed. 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 simulation of a heterogeneous mobile network operation in the licensed spectrum has been conducted and advantages of the proposed solutions have been confirmed.

Keywords: heterogeneous mobile networks, adaptive spectrum utilization, 5G software-defined mobile networks.

