

Кагало І.О., Бешлей М.І., Климаш М.М., Панченко О.М., Бешлей Г.В.

Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів

АДАПТИВНЕ ФОРМУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВОЇ РАДІОСТРУКТУРИ ІНТЕГРОВАНИХ МЕРЕЖ LTE/WI-FI

Запропоновано інтегровану LTE/Wi-Fi мережу мобільного оператора. Розроблено метод адаптивного формування структури інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi радіодоступу з уникненням міжрівневої інтерференції. Використання такого підходу до розбиття структури рівня пікокомірок, дозволяє максимально ефективно розмежувати зони дії кожної базової станції та забезпечити абонентів на межі розподілу комірок послугами з низьким рівнем інтерференційних завад. Використовуючи засоби імітаційного моделювання, розроблено модель інтегрованої мережі, яка в залежності від розподілу користувачького навантаження та просторової локалізації базових станцій LTE і Wi-Fi точок формує структуру мережі радіодоступу.

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

Kahalo I.O, Beshley M.I, Klimash M.M, Panchenko O.M., Beshley G.V.

National University "Lviv Polytechnic", m. Lviv

ADAPTIVE FORMATION OF A MULTILEVEL RADIOSTRUCTURE OF INTEGRATED LTE / WI-FI NETWORKS

An integrated LTE / Wi-Fi network of a mobile operator was offered, which uses the unlicensed range of Wi-Fi to construct combined LTE / LTE-U base stations. The method of adaptive formation of the structure of the integrated LTE / Wi-Fi radio access network with the prevention of inter-cell interference has been developed. This method is designed to form a radio access network using the principles of deterministic and stochastic geometry. The use of such an approach to the division of the structure of the picocell level makes it possible to differentiate the zones of operation of each base station and to provide subscribers with services on the border of cell division by the low level of interference. The simulation model of the integrated network was developed. This model depending on the distribution of user load and spatial localization of base stations LTE and Wi-Fi points forms the structure of the radio access network. The average bandwidth of the network provided by the final subscriber using various methods of radio structure formation has been estimated.

Keywords: *integrated network, subscriber load localization, LTE-U, picocell, network bandwidth, quality of service.*

Кагало И.А., Бешлей М.И., Климаш Н.Н., Панченко А.М., Бешлей Г.В

Национальный университет "Львовская политехника", г. Львов

АДАПТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ РАДІОСТРУКТУРЫ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СЕТЕЙ LTE / WI-FI

Предложено интегрированную LTE/Wi-Fi сеть мобильного оператора. Разработан метод адаптивного формирования структуры интегрированной сети LTE/Wi-Fi

радиодоступа с предотвращением межсотовой интерференции. Использование такого подхода к разбивке структуры уровня пикочеек, позволяет максимально эффективно разграничить зоны действия каждой базовой станции и обеспечить абонентов на границе раздела ячеек услугами с низким уровнем интерференционных помех. Используя средства имитационного моделирования, разработана модель интегрированной сети, в зависимости от распределения пользовательской нагрузки и пространственной локализации базовых станций LTE и Wi-Fi точек формирует структуру сети радиодоступа.

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

1. Вступ і постановка задачі

Трафік у мобільних мережах зростає за експоненціальним законом, а в майбутньому прогнозується зростання мобільного трафіку в 1000 разів. Сучасні мережі не можуть обслужити прогнозовані великі обсяги мобільного трафіку з достатнім рівнем QoS, тому необхідна побудова мобільних мереж нового покоління [1-3]. Мережі 5G повинні мати велику ємність, низьку затримку, велику швидкість передавання даних для кожного абонента. Здійснювати локальні вдосконалення мережі є не достатніми, потрібен комплексно новий підхід до проектування мережі, але при цьому нова концепція має будуватися на основі старої [5-7].

Оскільки, мережі нового покоління слід проектувати таким чином, щоб зберегти існуючу архітектуру мережі. Найкраще для цього підходить концепція гетерогенних мереж, тобто мереж, рівень радіодоступу яких має декілька рівнів базових станцій, що мають різні параметри. При цьому існує макропокриття зберігається, а в місцях найбільшого скупчення абонентів встановлюються пікокомірки та фемтокомірки. Малі комірки, за рахунок невеликої площі покриття дозволяють значно покращити системну спектральну ефективність, а також розвантажити макропокриття [8-9].

В першу чергу для переходу до мереж нового покоління потрібно модифікувати структуру рівня радіодоступу, щоб якомога ефективніше використовувати спектр частот, який в сьогоднішніх умовах є дуже дорогим. Безпосередня інтеграція і поєднання технологій радіодоступу LTE і Wi-Fi, розглянуті в цій роботі, мають ряд переваг. Наприклад, стільникові системи зв'язку пропонують просунуті механізми організації мобільності терміналів, тарифікації послуг та забезпечення інформаційної безпеки, тоді як локальні мережі доступу мають високу швидкість передавання, низьку вартість з'єднання і широке застосування в побуті. Очікується, 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 сумісних LTE/Wi-Fi модулів [10-12].

2. Аналіз літературних джерел

Проблематикою побудови та підвищення ефективності сучасних мереж мобільного зв'язку активно досліджувались такими провідними українськими та зарубіжними вченими як Л.Н. Беркман, А.І. Семенко, С. Г. Бунін, І. П. Лісовий, К. С. Сундучков, В.М. Безрук, Л. С. Глоба, В.О. Пелішок, Ю. Ю. Коляденко, А.О. Макаренко, М. Jo, Н. Hwa-Chen, X. Ge, С. Cho, М. Dohler, М. Haenni, А.L.F. de Almeida та багатьма іншими. В статті [13] запропоновано нову концепцію автоматизованого планування малих комірок в мультиоператорній мережі.

У роботі [14] розглянуто правила, принципи і типові сценарії впровадження LTE-U (LTE-Unlicensed) на основі 5 Гц Wi-Fi діапазону. Зокрема, встановлено, що найбільш критичною проблемою LTE-U є співіснування з іншими неліцензованими системами, такими як широко поширений Wi-Fi. Розглянуто основні методи їх сумісного співіснування. У

роботі [15] надаються докладні аналітичні моделі з використанням двох різних підходів випадкового доступу для розрахунку ймовірності зіткнень, з якими стикаються Wi-Fi станції, і оцінка пропускну здатності при їхньому використанні.

Незважаючи на велику кількість різноманітних рішень для підвищення ефективності мереж мобільного зв'язку, невирішеними досі залишаються завдання адаптивного формування гетерогенної радіоструктури при наявності великої кількості абонентських пристроїв та координованого використання неліцензійного діапазону Wi-Fi операторами мобільного зв'язку для підвищення спектральної ефективності. Одним із ключових невирішених завдань побудови гетерогенних мереж є введення малих комірок таким чином, щоб мінімізувати їх негативний вплив на деякі ключові показники ефективності, адже при інтеграції множини малих комірок виникає проблема з міжрівневою інтерференцією. Макрокомірки, що мають велику потужність передачі є потенційним джерелом завад для абонентів, що обслуговуються малими комірками

3. Мета і завдання дослідження

Впровадження великої кількості малих комірок – це дуже важливий крок до збільшення ємності мережі, але також і додаткові капітальні та експлуатаційні витрати для оператора. Хоча малі комірки розміщуються в місцях найбільшого скупчення абонентського навантаження, та деяку частину часу вони будуть простоювати, адже абонентське навантаження постійно мігрує. Саме тому доцільним є зменшення енергоспоживання мережі, внаслідок застосування методу адаптивного формування структури рівня радіодоступу, за допомогою якого малі комірки, які не обслуговують абонентського навантаження будуть переходити в енергозберігаючий режим, з можливістю швидкого переходу в звичайний режим в разі потреби.

Базові станції різних рівнів мають різні параметри, тому необхідно визначити критерії, згідно яких абонент буде обслуговуватися базовою станцією певного рівня. Корегування впливу цих критеріїв має здійснюватися відповідно до розподілу навантаження на структурні елементи мережі.

Метою даної роботи є дослідження способів адаптивного формування структури рівня радіодоступу в інтегрованих мережах LTE/Wi-Fi, та побудова на основі запропонованої концепції імітаційної моделі.

4. Концепція інтегрованої LTE/Wi-Fi мобільної мережі наступного покоління

Відповідно до сказаного вище в даній час спостерігається тенденція до більш тісної взаємодії різнорідних технологій радіодоступу. У зв'язку з цим в даній роботі, як приклад розглядається взаємодія точок доступу локальної мережі WLAN з малими комірками мобільного оператора в контексті організації відповідної архітектури системи зв'язку і з'ясування переваг різних форм інтеграції. На рис. 1 показано запропоновану інтегровану LTE/Wi-Fi мережу мобільного оператора. Мобільна інфраструктура включає в себе ієрархічну структуру комірок різного розміру, включаючи макрокомірки для забезпечення безшовного покриття, а також комірки різного розміру (пікосоти, фемтосоти, точки доступу Wi-Fi, суміщені LTE/Wi-Fi модулі та ін.) [16]. Управління рівнем радіодоступу буде здійснюватися з допомогою програмно-керованого ядра SDN [17-18], що використовує хмарне середовище для зберігання і обробки даних про мережу він визначає приблизне місцезнаходження абонента та параметрів його мобільності, проводить розрахунок SINR та інші обчислення.

До функцій контролера входять:

- моніторинг якості наданих послуг і стану мережі;
- побудова карти навантаження на основі сигналізаційних даних від абонентів;
- визначення обслуговуючого структурного елемента для абонентів;

– обробка і зберігання даних, отриманих від нижніх рівнів.

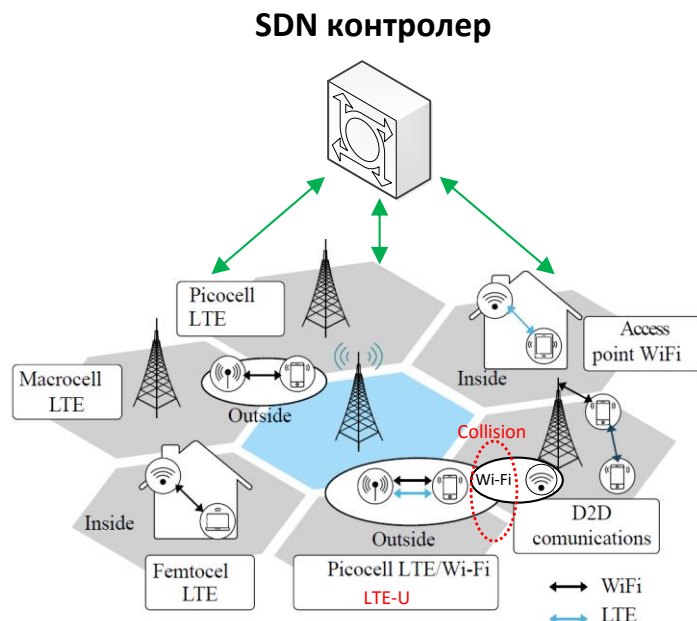


Рис. 1. Концепція інтегрованої мобільної мережі наступного покоління

На відміну від традиційного розвантаження трафіку користувачів з стільникового системи зв'язку в локальну мережу доступу, яка активно застосовувалася в гетерогенних мережах попередніх поколінь, в тісно інтегрованих системах 5G можливо суміщення функціоналу радіотехнологій LTE і Wi-Fi в рамках єдиного модуля доступу, так званої технології LTE-Unlicensed (LTE-U) [19-20]. Незважаючи на те, що такий нерегульований доступ до радіочастот значно спрощує вхід на відповідний ринок, він також створює ризик виникнення неконтрольованої інтерференції, яка, в свою чергу, ускладнює забезпечення необхідної якості обслуговування абонентів. Крім того, безліч користувачів загального спектра може потрапити в критичну ситуацію, в якій жоден з них не може досягти задовільного результату. Такий результат вкрай вірогідний в даний час, коли бурхливе зростання популярності мереж Wi-Fi і використання їх операторами мобільного зв'язку для розвантаження своїх стільникових мереж загрожують якості роботи систем, що функціонують на неліцензованих частотах. Усунення даного недоліку вимагає розробки ефективних засобів координування інтерференції, спільного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу.

5. Метод адаптивного формування структури інтегрованої мережі радіодоступу

Виходячи з мети роботи та поставлених у ній задач розроблено метод адаптивного формування структури радіодоступу з гарантуванням необхідної якості обслуговування та можливістю ширококутового передавання. Для реалізації цього методу вдосконалено процес роботи базових станцій усіх рівнів. Оскільки абонентське навантаження локалізоване нерівномірно, звичайний гексагональний шаблон розміщення базових станцій є недостатньо ефективним, адже в такому випадку буде спостерігатися нерівномірне завантаження базових станцій, адже одні будуть перевантажені, інші ж будуть простоювати. Максимально ефективною буде робота рівня радіодоступу, який формується 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. При проектуванні рівня радіодоступу мобільних мереж з таким підходом до розміщення базових станцій постає задача побудови зон близькості для всіх точок площини, для яких відстань s до об'єктів

множини $\{a_i\}$ є мінімальною. Ця задача вирішується з використанням принципів стохастичної геометрії а саме теселяції Вороного. Важливу роль для оператора має енергоефективність мережі, оскільки в гетерогенних мережах в 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 і приносить оператору прибуток. Коли базові станції не обслуговують жодного абонента слід їх переводити в режим енергозбереження і тим самим формувати структуру Radio Access Networ (RAN), яка буде підлаштовуватися під потреби абонентів, тобто параметри рівня радіодоступу будуть динамічно змінюватися залежно від абонентського навантаження та врахування покриття карти Wi-Fi. Знаючи розташування точок доступу Wi-Fi можна уникнути 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 та дасть змогу забезпечити більшу швидкість передавання даних для кінцевих користувачів.

Алгоритм адаптивного формування структури рівня радіодоступу базується на трьох основних етапах (рис.2). 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 алгоритму аналізується інформація, отримана в результаті виконання першого етапу та на її основі приймається рішення про те, яким чином обслуговувати абонентів. На третьому етапі приймається автоматизоване рішення про модифікацію, або формування (якщо не була створена до цього моменту) структури рівня радіодоступу.

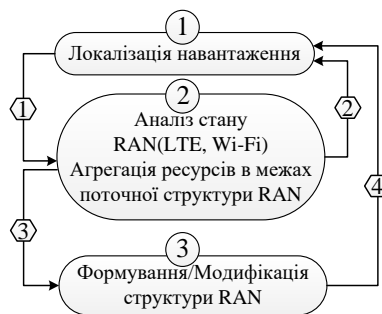


Рис.2. Загальний принцип роботи алгоритму адаптивного формування структури рівня радіодоступу

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». Детальний принцип роботи першого етапу алгоритму зображено на рис.3.

Після того, як на вхід базової станції макро рівня прийшла інформація від абонентів, вона дасть вказівку малим коміткам, використовуючи UL, розрахувати Channel State Information (CSI), 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.

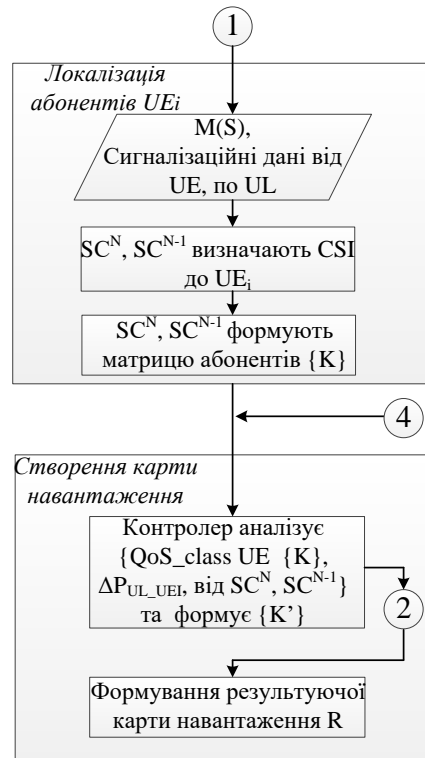


Рис.3. Локалізація абонентського навантаження та створення карти навантаження

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.

$$K_i = [UE_{reserv}, UE_{reserv}, \dots, UE_{reserv}], S_i = [UE_{current}, UE_{current}, \dots, UE_{current}]. \quad (1)$$

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} утворяться 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 .

$$R_i = \sum K_i + \sum S_i. \quad (2)$$

Для кожної з малих комірок утворюється матриця абонентів $\{K'\}$ (2.3), які потенційно повинні бути обслужені конкретною базовою станцією.

$$K'_i = K_i - \sum UE_{notserviced} \cdot \quad (3)$$

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

На основі керуючої інформації та карти поточного навантаження формується матриця $\{R'\}$ (4), 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.

$$R'_i = \sum K'_i + \sum S_i \quad (4)$$

Роботу другого етапу алгоритму, а саме аналіз стану рівня радіодоступу зображена на рис.4.

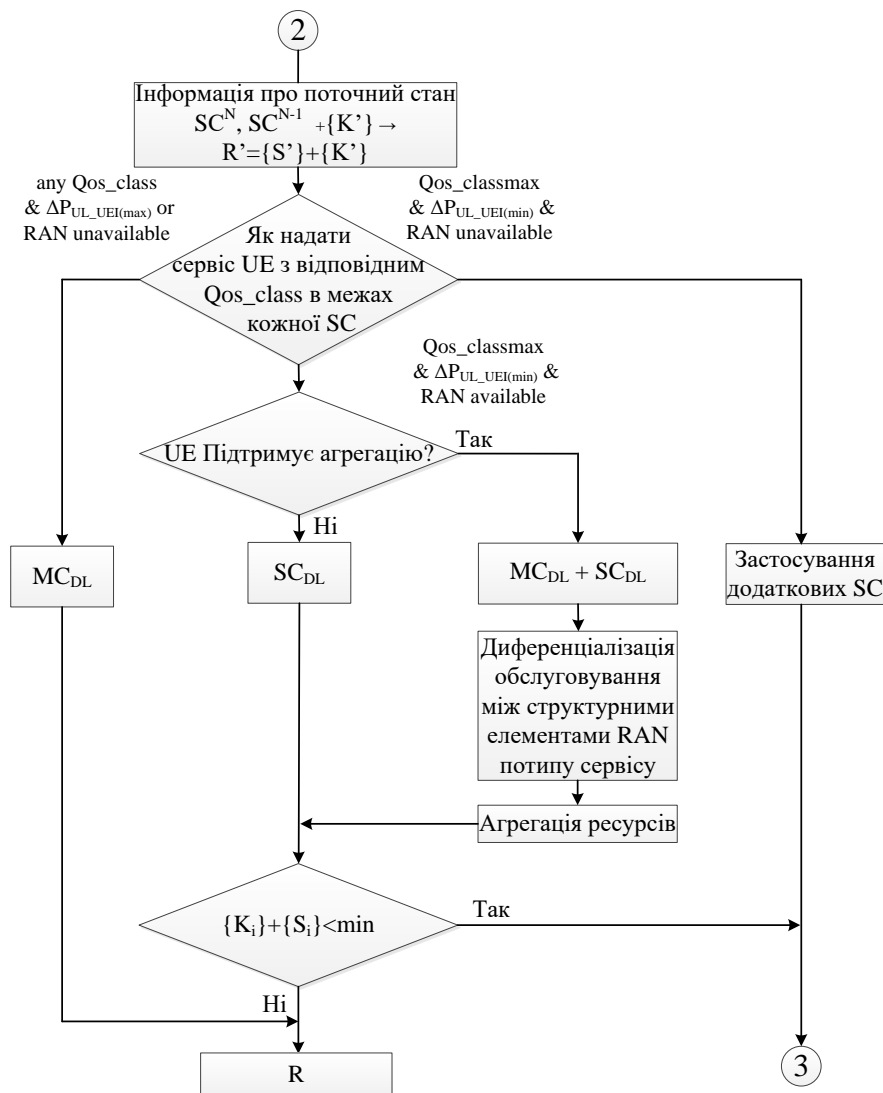


Рис.4. Другий етап алгоритму аналіз стану RAN

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 макрокомірною MC_{DL} . Також макрокомірною 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_{DL} . 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 $\{S_i\}$, що містить інформацію про активних абонентів малих комірок і використовуючи дані про розміщення базових станцій 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 (рис.5а). Далі здійснюється розрахунок та перевірка параметрів DL для UE та визначення обслуговуючих структурних елементів рівня радіодоступу для кожного UE_i згідно алгоритму представленого на рис. 5. б.

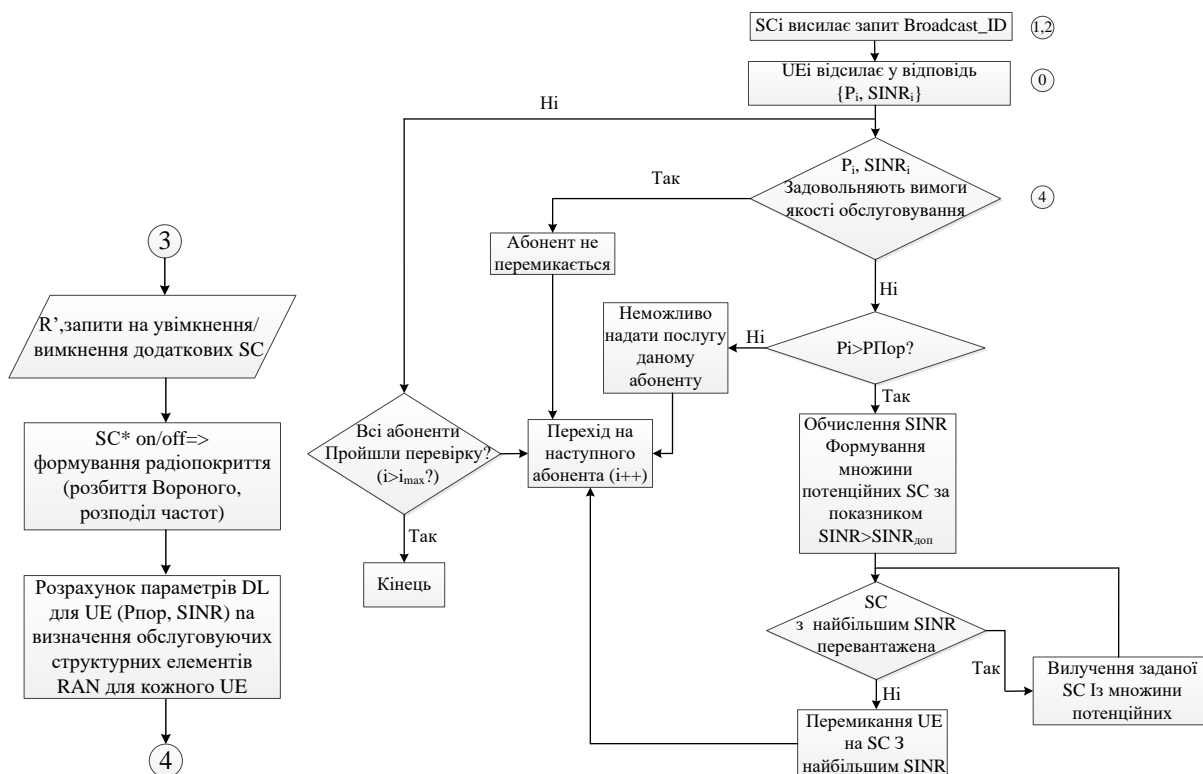


Рис. 5. а) Принцип роботи третього етапу алгоритму
б) Розрахунок параметрів DL для UE та визначення обслуговуючих структурних елементів рівня радіодоступу для кожного UE

Кожна SC формує множину абонентів, для яких значення прийнятої потужності сигналу більше деякого порогового значення $P_{пор}$. Для цього кожна SC посилає ширококомовний ехо-запит, що містить ідентифікатор даної SC до всіх абонентів в зоні своєї дії. Кожен UE, отримавши запит відповідає на нього вказавши значення потужності прийнятого сигналу, інтерференційних завад і шумів в тому ж діапазоні (P_i , $SINR_i$). Ці дані передаються до контролера. Він порівнює отримані значення потужності з пороговим і відкидає тих абонентів, у яких прийняте значення менше від порогового, адже цих абонентів неможливо обслуговувати, оскільки жодна з комірок не має достатньої потужності для цього. Тоді для кожного абонента з отриманої множини формується множина SC, для яких показник $SINR$ є більшим за допустиме значення. Ці SC формують множину потенційних абонентів, які могли б обслуговувати абонента. Далі з множини потенційних вибирається SC яка може обслужити абонента з найбільшим показником $SINR$ і перевіряється, чи не є вона перевантаженою. Якщо вибрана SC є перевантаженою вона вилучається з множини потенційних і процес повторюється знову, доки не буде вибрана SC яка може обслуговувати абонента. Тоді контролер дає вказівку на перемикання абонента до вибраної SC. Якщо ж усі SC виявляються перевантаженими абонента обслуговує макрокомірка. Якщо макрокомірка перевантажена, то застосовується обслуговування абонентів за технологією LTE-U, яка використовує 5ГЦ не ліцензійний діапазон Wi-Fi. Після виконання цих дій система повертається до виконання кроку 3 (блок створення карти навантаження).

Залежно від параметрів мобільності, послуг, якості сигналу абонентів і завантаженості базових станцій, абоненти обслуговуються коміркою певного радіусу відповідно до таких міркувань:

- Абоненти які здійснюють телефонні розмови, повинні завжди обслуговуватися макрокоміркою, оскільки тоді забезпечується мінімальна кількість хендверів, а сама телефонна розмова використовує мало ресурсів базової станції. Абоненти, які користуються послугою передачі даних, але їх трафік є малий, якщо це можливо, повинні бути обслужені макрокоміркою.

- Високомобільні абоненти, якщо це можливо, повинні обслуговуватися коміркою найбільшого радіусу.

- Малорухомих абонентів, що потребують високої пропускну здатності варто обслуговувати малими комірками, адже таким чином розвантажується макропокриття, яке, за рахунок цього може бути використане для обслуговування інших абонентів.

Використання алгоритму адаптивного формування рівня радіодоступу дозволяє покращити такі параметри мережі:

1) Зменшити енергоспоживання.

Перехід малих комірок в енергозберігаючий режим дає суттєвий виграв в електроенергії, оскільки в цьому режимі весь передавальний комплекс, такий, як передавальні антени, підсилювачі та ін. є виключеними.

Звичайно, що величина виграшу в електроенергії залежить від типу базової станції. Для прикладу візьмемо параметри базової станції Huawei AtomCell BTS3202B (табл.1).

Таблиця 1.
Параметри базової станції Huawei AtomCell BTS3202B

Виробник	Модель	Радіус дії, м	Споживча потужність, при звичайному режимі роботи, Вт/ год	Споживча потужність, режим енергозбереження, Вт/ год
Huawei	AtomCell BTS3202B	200	14.7	7.0

При роботі в звичайному режимі енергоспоживання однієї такої базової станції становить 14.7 Вт, а при роботі в енергозберігаючому режимі – 7 Вт, економія електроенергії становить 55%.

Слід зазначити, що в мережах 5G малі комірки будуть розміщуватися дуже щільно, тому питання енергоефективності є дуже важливим.

2) Мінімізувати інтерференційні завади між базовими станціями. Внутрішньоканальна інтерференція залежить від середньої відстані між комірками одного рівня. Використання даного алгоритму дозволить зменшити взаємні інтерференційні завади від базових станцій, що знаходяться неподалік, внаслідок зменшення кількості активних базових станцій в кожен момент часу і як наслідок покращення стану DL для частини абонентів.

3) Зменшення частоти хендверів для абонентів малих комірок.

Частота хендверів – показник якості обслуговування. Вона залежить від середньої відстані між базовими станціями. Коли абонент, що обслуговується однією базовою станцією переходить в зону дії іншої, відбувається хендвер. Якщо малі комірки розміщені дуже щільно, то процедура хендверу буде відбуватися часто при русі абонента. Внаслідок використання алгоритму адаптивного формування структури рівня радіодоступу зменшується кількість активних SC, зменшується частота хендверів

6. Модель мережі радіодоступу з адаптивною інтеграцією малих комірок.

Для оцінки ефективності запропонованих рішень було побудовано імітаційну модель. Імітаційну модель розроблено з використанням мови програмування C++ та LTE-A Downlink System Level Simulator. Модель складається з робочого поля, на якому розміщені станції 3-х рівнів: макростанції, пікостанції, Wi-Fi точки доступу. Центри макростанцій утворюють трикутник. В цьому трикутнику розміщені SC та Wi-Fi. Місцезнаходження пікокомірок встановлено відповідно до розробленого методу. Якщо є потенційне навантаження, вони вмикаються, коли навантаження на них немає, вони вимикаються і зникають із робочого поля. Ввімкнення і вимкнення пікокомірок призводить до зміни структури рівня радіодоступу.

Залежно від швидкості руху абонента і трафіку, який він буде генерувати, абонент буде обслуговуватися базовою станцією одного рівня, або декількома станціями різних рівнів (при агрегації спектру).

Для генерації трафіку та моделювання швидкості руху абонентів використовуються генератори на основі рівномірного та логнормального законів розподілу, які у поєднанні дають змогу отримати близькі до реальних мереж мобільного зв'язку сценарії поведінки абонентів.

Рух абонента в моделі є квазіпостійним. Це означає, що абонент деякий час буде рухатися з постійною швидкістю, після чого йому буде присвоєно нове значення швидкості руху. Напрямок руху розраховується відповідно до декількох сценаріїв, які розроблено в моделі:

1. Мінімальне навантаження на мережу. Рух абонентів є випадковим. Абоненти доволі рівномірно розподілені по полі моделі.

2. Зростання потенційного навантаження від абонентів. Досягається збільшенням кількості абонентів і їх рухом із деяким тяжінням до центру моделі.

3. Робота мережі в режимі в ГНН.

4. Поступове зменшення навантаження на мережу. Поступово зменшується кількість абонентів, вони рухаються від центра моделі. Подальший напрям руху – випадковий.

Індивідуальною особливістю абонента є ймовірність його активності. Зробимо припущення, що абоненти з ймовірністю P генерують трафік (активні абоненти) і з ймовірністю $(1 - P)$ не генерують ніякого навантаження (пасивні абоненти).

Перед початком роботи моделі потрібно створити всі об'єкти моделювання і задати їм певні параметри. Послідовність дій наступна:

1) Визначення позицій макрокомірок відбувається згідно принципів детермінованої геометрії. Координати першої базової станції визначаються довільно, після чого будується рівносторонній трикутник з вершиною що відповідає базовій станції, і стороною, що відповідає діаметру макрокомірки.

2) В трикутнику генерується статистичний розподіл абонентського навантаження.

3) Визначення позицій пікокомірок: згідно згенерованого розподілу визначаються позиції базових станцій використовуючи параметричний точковий процес, при цьому перевіряємо, чи згенерована базова станція не є ближче до сусідньої базової станції ніж на діаметр пікокомірки.

4) Генеруємо координати абонентів випадковим чином в межах робочого поля моделі. Присвоюємо абонентам атрибути.

Після того, як відбулася ініціалізація об'єктів моделювання, необхідно з певною періодичністю здійснювати зміни їх параметрів, а також оновлювати робоче поле моделі, графіки.

Саме моделювання відбувається з використанням об'єкта «таймер», який кожних 50 мілісекунд подає запит на оновлення робочого поля. При цьому виконуються такі операції:

1) Для кожного абонента проводиться перерахунок параметрів. Згідно поточної мобільності переміщуємо абонента шляхом зміни його координати.

2) Проводиться розрахунок потенційного абонентського навантаження на кожному комірку. Для кожної комірки визначається, чи необхідно змінити її стан.

3) Виводимо на робоче поле геометричні фігури: Очищуємо робоче поле, згодом виводимо на екран оновлення робочого поля, лінії розмітки, трикутник, базові станції, радіуси дії фемтокомірок та макрокомірок.

4) Проводимо теселяцію Вороного для пікокомірок (інтегрованої LTE/Wi-Fi(LTE-U)) в межах трикутника, отримуємо багатокутники, що описують зони дії базових станцій, виводимо лінії, що утворені теселяцією Вороного.

5) На робоче поле накладаємо абонентів.

6) Визначаємо потенційні базові станції абонента, які можуть його обслужити згідно принципів диференціації трафіку.

7) Від допустимої пропускної здатності віднімаємо пропускну здатність абонента.

8) Підраховуємо навантаження, спектральну ефективність, частку активних малих комірок, здійснюємо оновлення графіків.

Для отримання об'єктивних результатів, необхідно вдало підібрати параметри роботи моделі. Оскільки модель відображає роботу гетерогенної мережі з трьома рівнями базових станцій, то для кожного з рівнів базових станцій потрібно визначити такі параметри:

1) потужність випромінювання і середній радіус дії;

2) величина смуги частот;

3) режим передачі;

4) вид модуляції;

5) кількість базових станцій кожного рівня.

Згідно загальноживаної класифікації потужність МС становить 46 дБп, а радіус дії 1.2 км. Оскільки досліджувана область – один трикутник, який утворюється трьома базовими станціями, прийемо, що кількість МС рівна трьом (рис. 6). Смуга частот, що надається макрокомірці становить 20 МГц. Для підвищення ефективності використання частот і як наслідок збільшення пропускної здатності використовується режим передачі МІМО 4x4 та модуляція 64QAM, при якій один символ переносить одразу 6 біт.

Малі комірки працюють в режимі передачі МІМО 2x2, мають смугу частот по 15 та 5 МГц, використовують модуляцію 64QAM. Кількість комірок вибрана на початку

моделювання статично: пікокомірок – 25, фемтокомірок –15, а в процесі моделювання адаптується динамічно в залежності від локалізації абонентського навантаження. Потужність дії пікостанцій 23-30 дБп, радіус дії – 200-300м, потужність фемтокомірок – до 23 дБп, радіус дії – 50м.

Завдяки використанню методу адаптивного формування структури рівня радіодоступу спостерігаються коливання спектральної ефективності. При невеликому 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 ефективність спектра.

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) – функція, що описує ймовірність випадкової величини прийняти значення \leq конкретного значення.

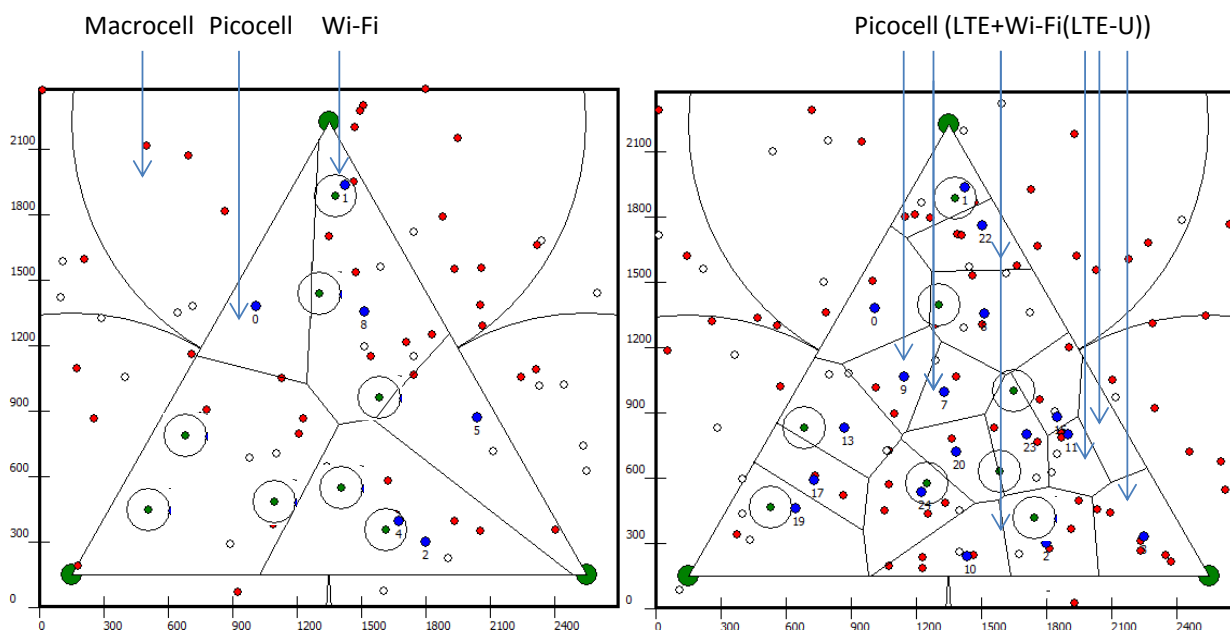


Рис.6. Топологія модельованої інтегрованої мережі LTE / LTE-U / Wi-Fi

На основі статистичних результатів, отриманих із серії моделювання 20, абоненту надається графік кумулятивної функції ймовірності (CDF) зі швидкістю передачі C Мбіт/с. На графіку на рис. 7 зображені криві, що відповідають чотирьом режимам роботи мережі:

1. Працює лише макрокомірка (MC), (SC) вимкнені.
2. Працює макрокомірка (MC) та пікокомірка (SC).
3. Інтегрована SC з підтримкою LTE-U (SC+LTE-U) вмикаються і вимикаються залежно від абонентського навантаження згідно запропонованого методу.
4. Постійно включені всі SC.

З фігури 4 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, а при обслуговуванні абонента в гетерогенній мережі з трьома рівнями базових станцій включаючи LTE-U використання не ліцензійного діапазону Wi-Fi, середня пропускну здатність становить 67-71 Мбіт/с, відповідно коли усі включені малі комірки середня пропускну здатність становить 70-75

Мбіт/с. Порівнюючи графіки отримані при конфігурації рівня радіодоступу таким чином, що включені усі малі комірки і коли працює метод адаптивного формування структури рівня радіодоступу варто відзначити, що в другому випадку при зменшенні пропускної здатності на 1 – 4 % спостерігається значний вигреш в електроенергії. Це дасть змогу оператору надавати абонентам такі послуги, як якісне потокове відео, відеодзвінки в мережі, доступ до послуг IoT, а також зручність телемедицини для кожного абонента.

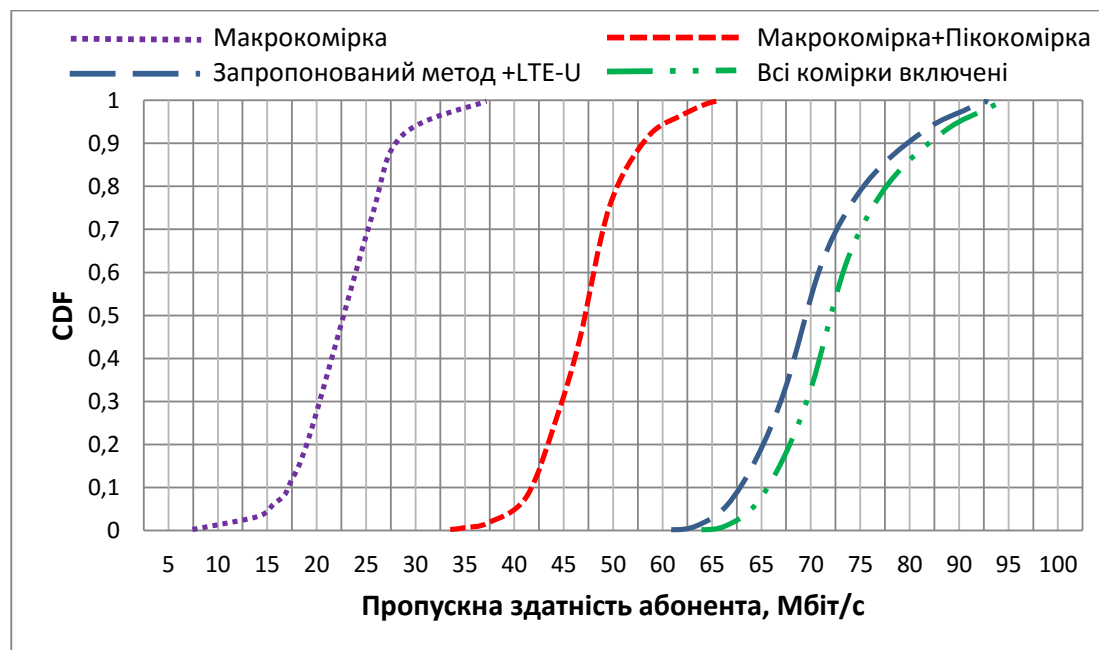


Рис. 7. Кумулятивна функція розподілу ймовірності середньої швидкості передавання для одного абонента в низхідному каналі при різних варіантах формування радіоструктури

Зменшення пропускної здатності рівня радіодоступу, при використанні алгоритму адаптивного формування структури рівня радіодоступу зумовлене порогом чутливості малих комірок при якому відбувається зміна їх стану. Тобто якщо мала комірка знаходиться в енергозберігаючому режимі і реєструючи запити від абонентів встановлює, що їм необхідно надати лише дуже малу пропускну здатність, то, в цілях економії електроенергії мала комірка не перейде в активний режим і абонента буде обслуговувати макрокомірка. В ГНН це може спричиняти деяке зменшення ємності мобільної мережі. Проте, регулюючи поріг чутливості базових станцій можна зближувати криві графіка CDF, тим самим збільшуючи ємність мережі збільшувати енергоспоживання, і навпаки, віддаляючи криві одна від одної зменшувати ємність мережі, але покращувати енергоефективність.

7. Висновки

На сьогоднішній день суміщені малі комірки LTE/Wi-Fi є однією з передових інновацій в телекомунікаційній індустрії і дозволяють знизити витрати на розгортання системи зв'язку за рахунок використання гібридної мережевої інфраструктури. Однак з огляду, що такий варіант розміщення комірок ще мало поширений на практиці, поточні роботи по стандартизації спрямовані також на поліпшення мережевої архітектури, в якій абонентські термінали приймають локальні рішення в умовах обмеженого сприяння з боку мережевої інфраструктури або ж при його відсутності.

У роботі запропоновано архітектуру гетерогенної мережі з трьома рівнями базових станцій, які розміщуються згідно принципів детермінованої та стохастичної геометрії що дає змогу відобразити реальну поведінку мережі радіодоступу при впровадженні малих комірок.

Використання такого підходу дає змогу збільшити пропускну здатність мережі і як наслідок якість обслуговування абонентів за рахунок більш рівномірного завантаження базових станцій. Для даної архітектури описано критерії обслуговування абонентів базовими станціями кожного з рівнів залежно від поточних параметрів мобільності, пропускну здатності, послуги абонента. Для покращення параметрів роботи мережі та можливості адаптації мережі під потреби абонентів запропоновано метод адаптивного формування структури рівня радіодоступу, що здійснює управління малими комірками відповідно до поточного абонентського навантаження. Роботу методу демонструє розроблена імітаційна модель, яка адекватно відображає структуру мережі рівня радіодоступу, генерування абонентів і їх параметрів, обслуговування абонентського навантаження. За допомогою імітаційної моделі можна досліджувати такі параметри роботи мережі, як навантаження на кожен із рівнів базових станцій, частка активних базових станцій, системна спектральна ефективність, ймовірність надання абоненту певної пропускну здатності, енергоефективність мережі.

References

1. H. Beshley, M. Klymash, M. Beshley and I. Kahalo, "Improving the Efficiency of LTE Spectral Resources Use by Introducing the New of M2M/IoT Multi-Service Gateway," *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Polyana, Ukraine* (2019): 114-117. Print.
2. H. Beshley, M. Kyryk, M. Beshley and O. Panchenko, "Method of Information Flows Engineering and Resource Distribution in 4G/5G Heterogeneous Network for M2M Service Provisioning," *2018 IEEE 4th International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS), Lviv* (2018): 229-233. Print.
3. M. Klymash, H. Beshley, O. Panchenko and M. Beshley, "Method for optimal use of 4G/5G heterogeneous network resources under M2M/IoT traffic growth conditions," *2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa* (2017): 1-5. Print.
4. E. Balevi and R. D. Gitlin, "A Clustering Algorithm That Maximizes Throughput in 5G Heterogeneous F-RAN Networks," *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kansas City, MO* (2018): 1-6. Print.
5. H. Beshley, M. Beshley, T. Maksymyuk and I. Strykhalyuk, "Method of centralized resource allocation in virtualized small cells network with IoT overlay," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske* (2018): 1147-1151. Print.
6. H. V. K. Mendis and F. Y. Li, "Achieving Ultra Reliable Communication in 5G Networks: A Dependability Perspective Availability Analysis in the Space Domain," in *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 9 (Sept. 2017): 2057-2060. Print.
7. M. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko and M. Beshley, "Algorithm for clusterization, aggregation and prioritization of M2M devices in heterogeneous 4G/5G network," *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkov* (2017): 182-186. Print.
8. D. Gonzalez G. and J. Hamalainen, "Planning and Optimization of Cellular Networks through Centroidal Voronoi Tessellations," *2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall), Boston, MA* (2015): 1-2. Print.
9. X. Ge, B. Yang, J. Ye, G. Mao, C. Wang and T. Han, "Spatial Spectrum and Energy Efficiency of Random Cellular Networks," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 3 (March 2015): 1019-1030. Print.

10. Y. Huo, X. Dong, W. Xu and M. Yuen, "Cellular and WiFi Co-design for 5G User Equipment," *2018 IEEE 5G World Forum (5GWF), Silicon Valley, CA* (2018): 256-261. Print.
11. A. S. Mubarak, H. Esmail and E. M. Mohamed, "LTE/Wi-Fi/mmWave RAN-Level Interworking Using 2C/U Plane Splitting for Future 5G Networks," in *IEEE Access*, vol. 6 (2018): 53473-53488. Print.
12. J. Milos, L. Polak and S. Rozum, "Analysis of Indoor LTE-DL/Wi-Fi Coexistence Scenarios with Automated Measurement Testbed," *2019 29th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), Pardubice, Czech Republic* (2019): 1-5. Print.
13. P. Muñoz, O. Sallent and J. Pérez-Romero, "Self-Dimensioning and Planning of Small Cell Capacity in Multitenant 5G Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 5, (May 2018): 4552-4564. Print.
14. R. Zhang, M. Wang, L.X. Cai, Z. Zheng, X. Shen, and L. Xie, "LTE-Unlicensed: The future of spectrum aggregation for cellular networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 22, no. 3, (June 2015): 150—159. Print.
15. A. Abdelfattah and N. Malouch, "Modeling and performance analysis of Wi-Fi networks coexisting with LTE-U," *IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications, Atlanta, GA* (2017): 1-9. Print.
16. I. Demydov, M. Seliuchenko, M. Beshley and M. Brych, "Mobility management and vertical handover decision in an always best connected heterogeneous network," *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, Lviv* (2015): 103-105. Print.
17. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko, O. Zyuzko and I. Kahalo, "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* (2018): 282-286. Print.
18. M. Klymash, M. Beshley, B. Strykhalyuk and T. Maksymyuk, "Research and development the methods of quality of service provision in Mobile Cloud systems," *2014 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), Odessa* (2014): 160-164. Print.
19. A. Bleicher, "A surge in small cell sites," *IEEE Spectrum*, vol. 50, no. 1, , Jan. 2013: 38-39. Print
20. R. Zhang, M. Wang, L.X. Cai, Z. Zheng, X. Shen, and L. Xie, "LTE-Unlicensed: The future of spectrum aggregation for cellular networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 22, no. 3, June 2015: 150-159. Print

Автори статті (Authors of the article)

Кагало Ігор Олександрович – асистент кафедри телекомунікацій (Kahalo Ihor Oleksandrovych – Assistant of the Department of Telecommunications). Phone: +38 (067) 291 81 32. E-mail: ihor.kahalo@gmail.com.

Бешлей Микола Іванович – к.т.н., асистент кафедри телекомунікацій (Beshley Mykola Ivanovych – PhD, Assistant of the Department of Telecommunications). Phone: +38 (093) 710 32 44. E-mail: beshlebmi@gmail.com.

Климаш Михайло Миколайович – д.т.н, професор, завідувач кафедри телекомунікацій (Klimash Mykhailo Mykolaiovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Telecommunications) Phone: +38 (097) 122 33 56. E-mail: mklimash@polynet.lviv.ua.

Панченко О.М. – аспірант кафедри телекомунікацій (Panchenko O.M. – postgraduate student of the Department of Telecommunications). Phone: +38 (068) 889 66 13. E-mail: oleksij@gmail.com.

Бешлей Г.В. – аспірант кафедри телекомунікацій (Beshley G.V. – postgraduate student of the Department of Telecommunications). Phone: +38 (093) 488 99 02. E-mail: halink@ukr.net.