

Ветошко І.П.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кравчук С.О.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВЗАЄМОДІЯ ТА СПІВІСНУВАННЯ МЕРЕЖ РАДІОДОСТУПУ LTE/NR

З'ясовано, що розробка та впровадження мереж п'ятого покоління (5G) стають не лише стратегічними напрямками розвитку телекомунікаційного сектору, але й критично важливими для покращення якості зв'язку та розширення спектру послуг для клієнтів операторів мобільного зв'язку. Одним із ключових аспектів впровадження 5G є співіснування з попередніми технологіями, зокрема LTE (Long Term Evolution), для ефективного використання спектру та забезпечення плавного переходу від попередніх стандартів до нових [1–4]. Визначено, що розвиток мереж LTE та NR (New Radio) відбувається паралельно, проте з врахуванням обмежень у використанні спектру та потреби у підтримці різноманітних послуг, виникає необхідність в оптимальному співіснуванні цих технологій [5–6]. Встановлено концепції динамічного спільного використання спектру LTE/NR, які дозволяють зберігати повну пропускну здатність та відповідні пікові швидкості передачі даних для обох технологій [7–8]. Зокрема, висвітлено підходи до узгодження швидкості передачі даних навколо сигналів LTE PSS/SSS, PBCH та CRS за допомогою концепції зарезервованих ресурсів на основі бітових карт. Це дозволяє ефективно координувати передачу даних між мережами LTE та NR, забезпечуючи оптимальну якість обслуговування для користувачів [9–11].

Визначено, що впровадження концепцій співіснування LTE/NR та узгодження передачі даних навколо ключових сигналів є кроком у напрямку оптимізації мереж мобільного зв'язку та підвищення їхньої ефективності, що сприятиме подальшому розвитку телекомунікаційної індустрії [9–11].

Ключові слова: NR, 5G, LTE, Dual-Connectivity, gNB, eNB, single-TX, IMD, HARQ, TDD, FDD, LTE PSS/SSS, LTE CRS.

Постановка проблеми. Початкове розгортання нового покоління технологій мобільного зв'язку, як правило, відбувається в районах з високою щільністю трафіку і високим попитом на нові можливості обслуговування. За цим слідує поступове подальше розгортання, яке може бути більш або менш швидким залежно від стратегії оператора. Під час такого поступового розгортання повсюдне покриття мережі оператора забезпечується поєднанням нових і застарілих технологій, при цьому пристрої постійно переміщуються в зони покриття нової технології і з них. Тому безперешкодний перехід від нової до застарілої технології є ключовою вимогою принаймні з моменту впровадження перших мереж 3G.

Крім того, навіть у тих сферах, де впроваджено нову технологію, попередні покоління пристроїв, як правило, повинні зберігатися і працювати паралельно протягом відносно тривалого часу, щоб забезпечити безперервне обслуговування застарілих пристроїв, які не підтримують нову технологію. Більшість користувачів перейдуть на нові пристрої, що підтримують новітні технології, протягом декількох років. Однак обмежена кіль-

кість застарілих пристроїв може залишитися ще надовго. Це стає ще більш актуальним у зв'язку зі збільшенням кількості мобільних пристроїв, які не використовуються безпосередньо людьми, а є інтегрованою частиною іншого обладнання, такого як паркомати, зчитувачі карток, камери відеоспостереження тощо. Таке обладнання може мати термін служби понад 10 років, і очікується, що воно залишатиметься підключеним до мережі протягом цього терміну. Це, власне, одна з важливих причин, чому багато мереж GSM другого покоління все ще працюють, незважаючи на те, що згодом були розгорнуті мережі 3G і 4G.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень і публікацій з питань співіснування мереж LTE та NR є ключовим етапом для зрозуміння поточного стану цієї області та виявлення перспективних напрямків досліджень. Згідно з результатами досліджень, дана тема вже привертає значну увагу вчених та індустрії, оскільки це є важливим кроком у розвитку бездротових технологій. Аналіз останніх публікацій та досліджень дає можливість отримати комплексне уявлення про сучасний стан цієї тематики та ідентифікувати

ключові аспекти її вирішення. Один із головних аспектів досліджень полягає у розробці та впровадженні стандарту 5G NR, що є фундаментальним для ефективного співіснування мереж [1; 11].

Детальний аналіз архітектурних та технічних аспектів стандарту 5G NR, який представлений у літературі, розкриває технологічні виклики та можливості, що визначають подальший розвиток цього напрямку [1; 11]. Також важливим є розгляд системних аспектів мобільних інфокомунікацій, що розкриваються в літературі з питань теорії систем та системної архітектури [2–4]. Це сприяє глибокому розумінню компонентів системи та їх взаємодії, що важливо для успішного співіснування мереж LTE та NR. Зокрема, дослідження зосереджують увагу на можливостях покращення якості голосових послуг у мережах 5G, виявляючи фактори, що впливають на ефективність та надійність комунікацій [5–9]. Це сприяє розробці та впровадженню нових технологій для оптимізації голосового обміну в пакетних мережах мобільного зв'язку. Загалом, автори наукових публікацій наголошують на значенні впровадження новітніх технологій та стратегій для оптимізації голосового обміну у пакетних мобільних мережах зв'язку.

Постановка завдання. Мета роботи полягає у глибокому аналізі та комплексному уявленні про сучасний стан досліджень і публікацій щодо співіснування LTE/NR. Основною метою є ретельне вивчення технічних та архітектурних аспектів впровадження стандартів 5G NR та їх взаємодії зі стандартами LTE для оптимізації передачі даних у сучасних мобільних мережах. Дослідження спрямовані на визначення ключових технологічних викликів, які виникають у контексті співіснування LTE/NR, а також на пошук оптимальних стратегій реалізації цих стандартів зв'язку для підвищення продуктивності та ефективності мобільних мереж. Такий науковий підхід дозволить не лише виявити потенційні переваги використання нових технологій, а й визначити прогалини та напрямки подальших досліджень у цій області.

Виклад основного матеріалу

Подвійне підключення LTE/NR

Взаємодія між NR (New Radio) і LTE (Long Term Evolution) йде далі, ніж просто забезпечення плавного переходу між двома технологіями і можливість їх паралельного розгортання:

- NR дозволяє *подвійне підключення* (dual-connectivity) до LTE, що означає, що пристрої можуть мати одночасне підключення як до LTE, так і до NR. Перша версія NR 15-го релізу 3GPP фактично покладається на таке подвійне підключення, при цьому LTE забезпечує площину управ-

ління, а NR лише надає додаткову пропускну здатність у площині користувача;

- NR може бути розгорнута в тому ж спектрі, що і LTE, таким чином, що загальна пропускну здатність спектру може динамічно розподілятися між двома технологіями. Таке співіснування спектру (Spectrum Coexistence) дозволяє більш плавно впроваджувати NR у спектрах, що вже зайняті технологією LTE.

Основний принцип Dual-Connectivity LTE/NR такий самий, як і Dual-Connectivity LTE [1] (рис. 1):

- Пристрій має одночасне підключення до декількох вузлів мережі радіодоступу (eNB у випадку LTE, gNB у випадку NR);

- Існує один головний вузол (Master Node) (у загальному випадку або eNB, або gNB), який відповідає за площину управління радіодоступом. Іншими словами, на стороні мережі радіоканал сигналізації закінчується на головному вузлі, який потім також обробляє всю конфігурацію пристрою на основі RRC (Radio Resource Control);

- Існує один або, в загальному випадку, декілька вторинних вузлів (secondary node) (eNB або gNB), які забезпечують додаткові зв'язки з користувацькою площиною для мобільного пристрою [1].

Сценарій розгортання

У випадку Dual-Connectivity LTE декілька вузлів, до яких пристрій має одночасне підключення, зазвичай географічно розділені. Пристрій може, наприклад, мати одночасне підключення до рівня малих стільників (small-cell layer) і накладеного макрорівня (overlaid macro layer).

Такий самий сценарій, тобто одночасне підключення до рівня малих стільників і накладеного макрорівня, є дуже актуальним і для Dual-Connectivity LTE/NR. Зокрема, NR у більш високочастотних діапазонах може бути розгорнутий як small-cell layer під існуючим макрорівнем на основі LTE (рис. 2). Макрорівень LTE в такому випадку буде забезпечувати головні вузли, гарантуючи, що площина управління збережеться, навіть якщо зв'язок з високочастотним рівнем малих стільників тимчасово втрачено. У цьому випадку рівень NR забезпечує дуже високу пропускну здатність і дуже високу швидкість передачі даних, а Dual-Connectivity до низькочастотного макрорівня на основі LTE забезпечує додаткову надійність менш надійного за своєю суттю високочастотного рівня малих стільників. Варто зауважити, що це, по суті, той самий сценарій з подвійним підключенням LTE, за винятком використання NR замість LTE на рівні малих стільників [1].

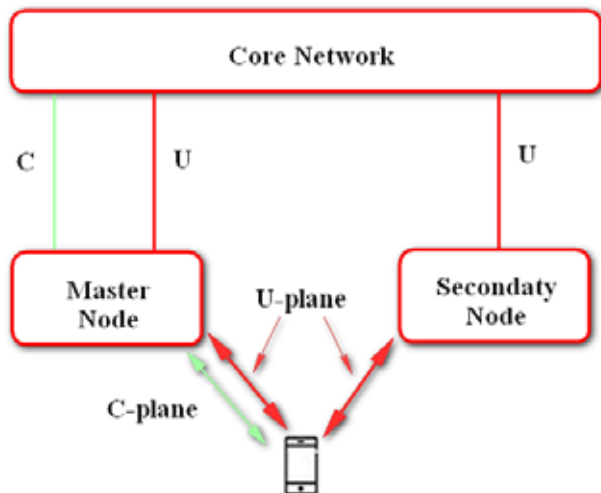


Рис. 1. Основний принцип Dual-Connectivity

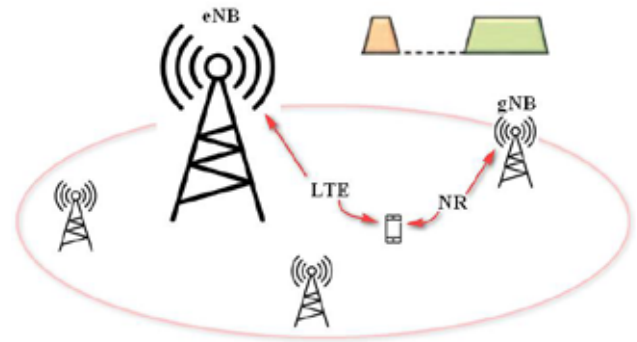


Рис. 2. Dual-Connectivity LTE/NR у багаторівневому сценарії

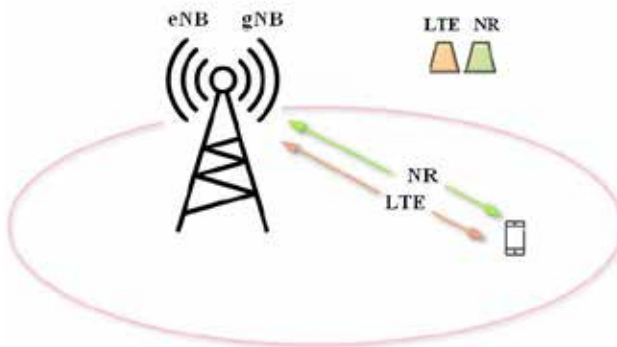


Рис. 3. Спільне (Co-sited) розгортання Dual-Connectivity LTE/NR

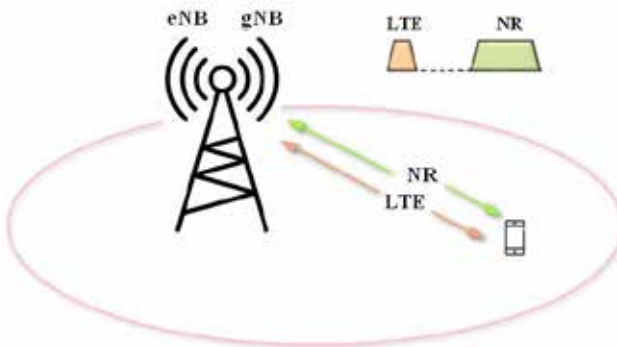


Рис. 4. Dual-Connectivity LTE/NR, спільне (Co-sited) розгортання в різних спектрах

Однак Dual-Connectivity LTE/NR також актуальне у випадку спільного розташування вузлів мереж LTE і NR (рис. 3). Наприклад, для початкового розгортання NR оператор може захо-

тити повторно використовувати вже розгорнуту мережу вузлів LTE також і для NR, щоб уникнути витрат на розгортання додаткових вузлів. У цьому сценарії Dual-Connectivity забезпечує вищу швидкість передачі даних для кінцевих користувачів завдяки об'єднанню пропускної здатності мереж NR і LTE. У випадку єдиної технології радіодоступу таке об'єднання між несучими, що передаються з одного вузла, було б більш ефективно реалізовано за допомогою агрегації несучих. Однак NR не підтримує агрегацію несучих з LTE, тому для підтримки агрегації пропускної здатності LTE і NR необхідне подвійне підключення [2].

Спільне (Co-sited) розгортання особливо актуальне, коли NR працює в більш низькочастотному спектрі, тобто в тому ж або схожому спектрі, що і LTE. Однак спільне розгортання може також використовуватися, коли обидві технології працюють в дуже різних спектрах, включаючи випадок, коли NR працює в міліметрових діапазонах (рис. 4). У цьому випадку NR може бути не в змозі забезпечити покриття по всій площі стільника. Однак частина мережі NR все одно може перехоплювати значну частину загального трафіку, тим самим дозволяючи частині LTE зосередитися на наданні послуг пристроям у місцях з поганим покриттям [3].

У сценарії на рис. 4 несуча NR, як правило, має набагато ширшу смугу пропускання порівняно з LTE. Отже, поки є покриття, оператор NR у більшості випадків забезпечуватиме значно вищу швидкість передачі даних порівняно з LTE, що робить агрегацію пропускної здатності менш важливою [4]. Швидше за все, головною перевагою Dual-Connectivity в цьому сценарії буде, знову ж таки, підвищена надійність для розгортання високочастотного зв'язку.

Варіанти архітектури

Через наявність двох різних технологій радіодоступу (LTE і NR), а також майбутню доступність нової базової мережі 5G як альтернативи застарілій базовій мережі 4G (EPC), існує декілька різних альтернатив, або варіантів, для архітектури Dual-Connectivity LTE/NR (рис. 5). Позначення різних варіантів походить від ранніх дискусій 3GPP щодо можливих варіантів архітектури NR, коли обговорювалася низка різних альтернатив, підмножину котрих, в кінцевому підсумку, було вирішено підтримати [5].

Можна відзначити, що Dual-Connectivity LTE/NR з використанням EPC з NR, що забезпечує Master Node, не включено до числа варіантів, представлених на рис. 5, оскільки можлива підтримка цієї альтернативи все ще обговорюється серед провідних організацій по стандартизації [1].

Робота з одним передавачем (SINGLE-TX)

У випадку Dual-Connectivity між LTE і NR буде декілька несучих висхідної лінії зв'язку (принаймні одна несуча LTE і одна несуча NR), що передаються з одного і того ж пристрою. Через нелінійність радіочастотної схеми одночасна передача на двох несучих створюватиме продукти інтермодуляції на виході передавача. Залежно від конкретних несучих частот сигналів, що передаються, деякі з цих продуктів інтермодуляції можуть опинитися в смузі приймача пристрою, викликаючи «самоінтерференцію», яку також називають інтермодуляційними спотвореннями (Intermodulation Distortion, IMD). Це збільшить шум приймача і призведе до погіршення його чутливості. Вплив інтермодуляційних спотворень можна зменшити, встановивши жорсткіші вимоги до лінійності пристрою. Однак це матиме відповідний негативний вплив на вартість пристрою і споживання енергії [6].

Щоб зменшити вплив IMD, не встановлюючи дуже жорстких вимог до радіочастотного

діапазону для всіх пристроїв, NR дозволяє Dual-Connectivity з одним передавачем (single-TX) для «складних смугових комбінацій». У цьому контексті складні смугові комбінації відповідають спеціально визначеним комбінаціям частотних діапазонів LTE і NR, для яких продукти інтермодуляції нижчого порядку між одночасно переданими несучими висхідної лінії LTE і NR можуть потрапляти у відповідну смугу низхідної лінії. Робота в режимі Single-TX означає, що в пристрої не буде одночасної передачі на несучих висхідної лінії LTE і NR, навіть якщо пристрій працює в режимі Dual-Connectivity LTE/NR [5].

Завданням планувальників LTE і NR є спільне запобігання одночасному передаванню на несучих висхідної лінії LTE і NR у разі роботи в режимі single-TX. Це вимагає координації між планувальниками, тобто між eNB і gNB. Специфікації 3GPP включають явну підтримку обміну стандартизованими міжвузловими повідомленнями для цієї мети [2].

Робота в режимі single-TX по суті призводить до часового мультиплексування (TDD) між передачами висхідної лінії LTE і NR в межах пристрою, при цьому жодна з висхідних ліній не є постійно доступною [1]. Однак бажано мати можливість повністю використовувати відповідні несучі низхідного каналу. Для NR, з його високим ступенем планування і гнучкістю гібридного автоматичного запиту на повторення (Hybrid automatic repeat request, HARQ), цього можна легко досягти без додаткового впливу на специфікації NR. Для частини з'єднання LTE ситуація дещо інша. LTE FDD базується на синхронному HARQ, де зворотний зв'язок HARQ висхідної лінії повинен передаватися через певну кількість підкадрів після отримання відповідної передачі низхідної лінії. При обмеженні single-TX не всі підкадри висхідної лінії будуть доступні для передачі зворотного зв'язку HARQ, що потенційно обмежує

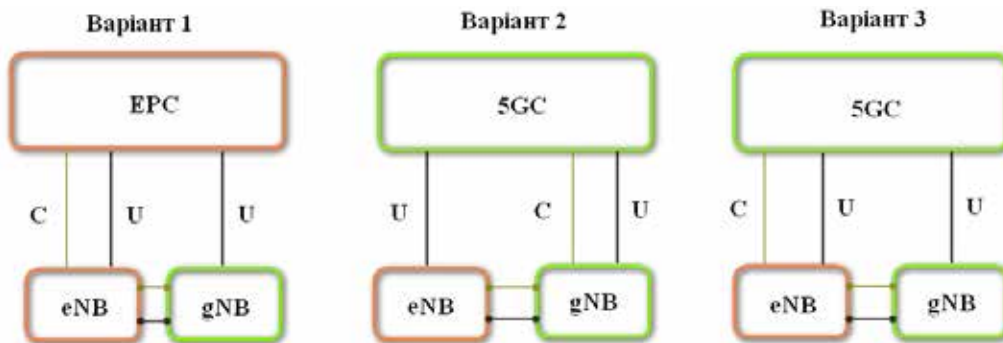


Рис. 5. Різні варіанти архітектури для Dual-Connectivity LTE/NR

кількість підкадрів, в яких може відбуватися передача низхідної лінії [7].

Однак, така ж ситуація може виникнути вже всередині самої LTE, зокрема, у випадку агрегації несучих FDD/TDD, коли несуча TDD є первинним стільником [1]. У цьому випадку TDD-несуча, яка за своєю природою не є постійно доступною для передачі висхідної лінії, несе зворотний зв'язок HARQ висхідної лінії, що корелює з передачею низхідної лінії на FDD-носії. Щоб впоратися з цією ситуацією, в 13-й версії LTE були введені так звані еталонні конфігурації DL/UL [1], що дозволяють забезпечити TDD-подібне часове співвідношення, наприклад, для зворотного зв'язку по висхідній лінії, для несучої FDD. Таку ж функціональність можна використовувати для підтримки безперервної низхідної передачі LTE у випадку Dual-Connectivity LTE/NR, обмеженої роботою в режимі single-TX [8].

У сценарії агрегації несучих LTE FDD/TDD обмеження на висхідну лінію обумовлені конфігураціями низхідної/висхідної лінії на рівні стільника. З іншого боку, у випадку Dual-Connectivity з single-TX обмеження пов'язані з необхідністю уникнути одночасної передачі на несучих LTE і NR, але без жорсткої взаємозалежності між різними пристроями. Таким чином, набір недоступних підкадрів висхідної лінії зв'язку може не бути однаковим для різних пристроїв. Щоб забезпечити більш рівномірне навантаження на висхідну лінію LTE, еталонні конфігурації DL/UL у разі роботи з single-TX можуть бути зміщені в часі для кожного пристрою окремо [2].

Співіснування LTE/NR

Поява попередніх поколінь мобільного зв'язку завжди була пов'язана з впровадженням нового спектру, в якому можна було б розгорнути нову технологію. Це стосується і NR, для якого підтримка роботи в міліметровому діапазоні хвиль відкриває можливість використання діапазону спектру, який ніколи раніше не застосовувався для мобільного зв'язку.

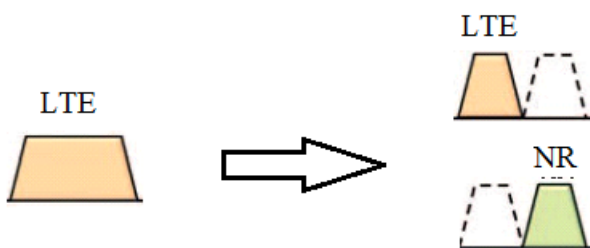


Рис. 6. Міграція спектру LTE до NR

Навіть з урахуванням використання антенних конфігурацій з великою кількістю антенних елементів, що дозволяють формувати широкую діаграму спрямованості, робота в такому високо-частотному спектрі за своєю суттю є не вигідною з точки зору покриття. Натомість, для забезпечення дійсно широкого покриття NR необхідно використовувати більш низькочастотний спектр. Однак більша частина низькочастотного спектру вже зайнята сучасними технологіями, насамперед LTE. Крім того, у відносно близькому майбутньому планується розгортання додаткового низькочастотного спектру разом з LTE. Тому в багатьох випадках розгортання NR в низькочастотному спектрі повинно відбуватися в спектрі, який вже використовується LTE. Найпростіший спосіб розгортання NR у спектрі, який вже використовується LTE, – це статичний розподіл частотних доменів, коли частина спектру LTE мігрує до NR (рис. 6). Однак у такого підходу є два недоліки [6].

Принаймні на початковому етапі основна частина трафіку все ще буде передаватися через LTE. У той же час, статичний розподіл частотного діапазону зменшує спектр, доступний для LTE, що ускладнює задоволення потреб на трафік [8]. Крім того, статичний розподіл частотних діапазонів призведе до зменшення пропускної здатності для кожної технології, що в свою чергу, знизить пікову швидкість передачі даних на одного оператора. Можливе використання Dual-Connectivity LTE/NR може компенсувати це для нових пристроїв, здатних до такої роботи. Однак, принаймні для застарілих пристроїв LTE це матиме прямий вплив на досягну швидкість передачі даних.

Більш прийнятним рішенням є динамічне спільне використання спектру NR і LTE, як показано на рис. 7. Таке співіснування спектру збереже повну пропускну здатність і відповідні пікові швидкості передачі даних для кожної технології. Крім того, загальна пропускну здатність спектру може динамічно розподілятися відповідно до умов трафіку в кожній технології [9].

Фундаментальним інструментом для забезпечення такого співіснування спектру LTE/NR є динамічне планування як LTE, так і NR. Однак є ще декілька функцій NR, які відіграють важливу роль у загальній підтримці співіснування спектру LTE/NR:

- Наявність LTE-сумісної нумерології NR на частоті 15 кГц, яка дозволяє LTE і NR працювати в загальній часовій/частотній сітці;
- Загальні принципи проектування прямої сумісності NR, можливість визначення зарезервованих ресурсів на основі бітових карт;

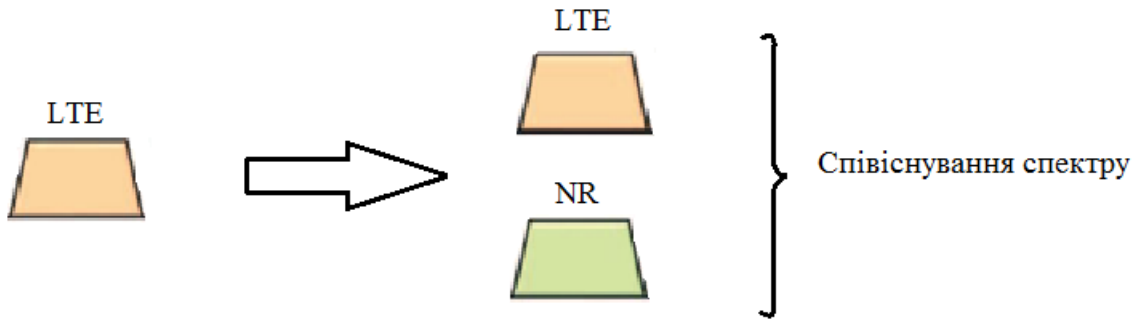


Рис. 7. Співіснування спектру LTE/NR

• можливість відображення NR PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) для уникнення елементів ресурсів, що відповідають опорним сигналам конкретних стільників LTE [9].

На рис. 8 зображено два основних сценарії співіснування LTE/NR:

- Співіснування як у низхідній, так і у висхідній лінії зв'язку;
- Співіснування лише у висхідній лінії зв'язку.

Типовим випадком використання для співіснування лише у висхідному напрямку є розгортання гнучкої несучої висхідної лінії зв'язку. Загалом, співіснування у висхідному напрямку є більш простим порівняно з низхідним напрямком і може бути забезпечене, в значній мірі, за допомогою координації/обмежень у плануванні. Планування висхідної лінії NR і LTE має бути скоординованим, щоб уникнути зіткнення між передачами PUSCH (Physical Uplink Shared Channel) в LTE і NR. Крім того, планувальник NR повинен бути обмежений, щоб уникнути використання ресурсів, що використовуються для сигналізації управління 1-го рівня висхідної лінії LTE (PUCCH, Physical Uplink Control Channel), і навпаки. Залежно від рівня взаємодії між eNB і gNB, така координація та обмеження можуть бути більш або менш динамічними [1].

Також для низхідної лінії зв'язку слід використовувати координацію планування, щоб уникнути колізій між запланованими передачами LTE і NR.

Однак низхідна лінія LTE також включає декілька незапланованих «постійно увімкнених» сигналів, які не можуть бути легко заплановані. До них відносяться [1]:

- LTE PSS (Primary Synchronization Signal) і SSS (Secondary Synchronization Signal), які передаються через два символи OFDM і шість ресурсних блоків в частотній області один раз в кожному п'ятому підкадрі;
- LTE PBCH (Physical Broadcast Channel), який передається чотирма символами OFDM і шістьма блоками ресурсів у частотній області один раз у кожному кадрі (10 підкадрів) [9];
- LTE CRS (Cell specific Reference Signal), який передається регулярно в частотній області і чотирма або шістьма символами в кожному підкадрі залежно від кількості портів антени CRS.

Замість того, щоб уникати цього за допомогою планування, концепція зарезервованих ресурсів може бути використана для узгодження швидкості NR PDSCH навколо цих сигналів [10]. Узгодження швидкості навколо LTE PSS/SSS можна здійснити, визначивши зарезервовані ресурси відповідно до бітових карт. Більш конкретно, один зарезервований ресурс, заданий триплетом {бітове зображення-1, бітове зображення-2, бітове зображення-3}, може бути визначений наступним чином (рис. 9):

- Бітове зображення-1 довжиною, що дорівнює кількості ресурсних блоків NR в частотній області, що вказує на шість ресурсних блоків, в межах яких передаються LTE PSS і SSS;

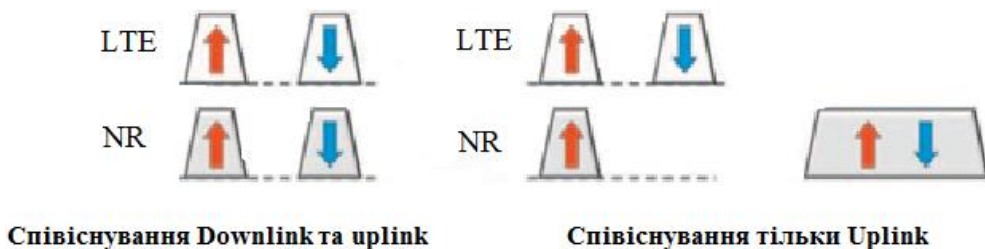


Рис. 8. Співіснування низхідної та висхідної лінії зв'язку проти співіснування лише висхідної лінії зв'язку

- Бітове зображення-2 довжиною 14 (один слот), що вказує на два OFDM-символи, в межах яких PSS і SSS передаються в підкадрі LTE;
- Бітове зображення-3 довжиною 10, що вказує на два підкадри, в яких PSS і SSS передаються в межах кадру тривалістю 10 мс [11].

Це передбачає нумерологію NR 15 кГц. Варто зауважити, що використання зарезервованих ресурсів на основі бітових карт не обмежується нумерацією 15 кГц і, в принципі, подібний підхід до узгодження швидкості навколо LTE PSS і SSS може бути використаний також, наприклад,

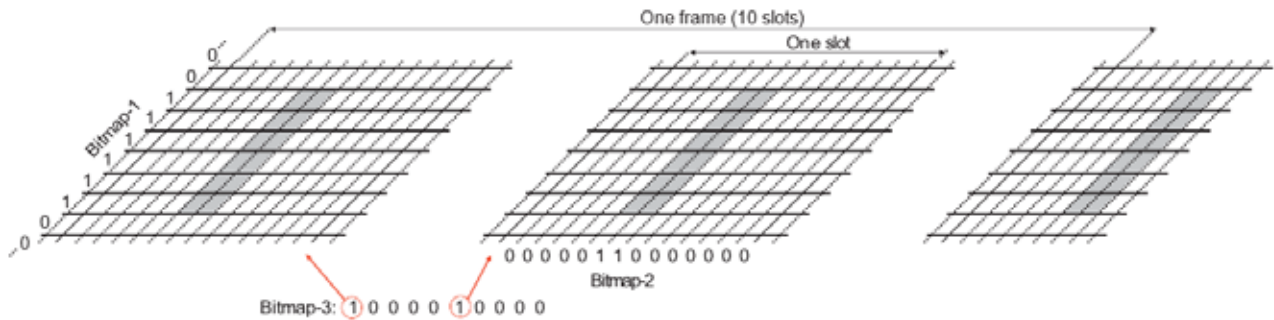


Рис. 9. Конфігурація зарезервованого ресурсу для забезпечення узгодження швидкості PDSCH навколо LTE PSS/SS. На рисунку використовується нумерологія NR 15 кГц

з нумерацією NR 30 кГц [9]. Такий самий підхід може бути використаний для узгодження швидкості навколо LTE PBCH з тією лише різницею, що бітове зображення-2 в цьому випадку вказуватиме на чотири символи, в межах яких передається PBCH, тоді як бітове зображення-3 вказуватиме на один підкадр.

Що стосується CRS LTE, специфікація NR включає явну підтримку узгодження швидкості PDSCH навколо елементів ресурсів, що відповідають CRS накладеного оператора LTE [9]. Для того, щоб мати змогу належним чином приймати такий PDSCH з узгодженою швидкістю, пристрій конфігурується з наступною інформацією:

- Смуга частот і розташування несучої LTE, щоб забезпечити співіснування LTE/ NR, навіть якщо несуча LTE може мати іншу смугу частот і інше розташування центральної несучої порівняно з несучою NR [11];
- конфігурація підкадру MBSFN LTE (Multimedia Broadcast multicast service Single Frequency Network), оскільки вона впливає на набір OFDM-символів, в яких відбувається передача CRS в даному підкадрі LTE [9];
- Кількість портів антени LTE CRS, оскільки це вплине на набір OFDM-символів, в яких відбувається передача CRS, а також на кількість еле-

ментів ресурсу CRS на блок ресурсу в частотній області;

- Зсув LTE CRS, тобто точне положення LTE CRS в частотній області.

Узгодження швидкості навколо LTE CRS можливе лише для нумерології NR 15 кГц [9].

Висновки. Стандарти 5G NR та LTE розглядаються як ключові елементи в розвитку мобільного зв'язку, і їх спільне використання відкриває широкі можливості для підвищення продуктивності та ефективності передачі даних. Дослідження показали, що співіснування спектру LTE/ NR може бути успішно здійснене за допомогою динамічного планування та координації ресурсів, що дозволяє забезпечити оптимальне використання доступного спектру. Важливим аспектом є також узгодження швидкості передачі даних навколо сигналів LTE та NR, що дозволяє підтримувати стабільний зв'язок та забезпечити якісне обслуговування абонентів.

У результаті проведених досліджень виявлено, що розвиток мобільних мереж у напрямку співіснування LTE/NR є перспективним і має великий потенціал для подальшого росту та вдосконалення зв'язку. Продовження досліджень у цій області сприятиме подальшій оптимізації та розвитку мобільних технологій.

Список літератури:

1. E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skoold, 4G LTE-Advanced Pro and the Road to 5G, Elsevier, 2016.
2. Ветошко І.П., Кравчук С.О. Структурні особливості реалізації голосових послуг VONR в мережі мобільного зв'язку стандарту 5G. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35. № 1. Р. 27–33. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/04>

3. 3GPP RP-172021, Study on NR-Based Access to Unlicensed Spectrum.
4. Ветошко І.П., Кравчук С.О. Розгортання голосових сервісів у мережах 5G. *Grail of Science*. 2023. № 24. С. 278–281. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.02.2023.051>.
5. 3GPP TS 23.501, System Architecture for the 5G System.
6. Кравчук С.О. Теорія систем мобільних інфокомунікацій. Системна архітектура [Електронний ресурс]: навч. посіб. за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / С. О. Кравчук ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові данні (1 файл: 18,17 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 683 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53198>
7. Vetoshko I., Kravchuk S. Opportunities to Improve the Quality of Voice Services in 5G Networks // 2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), ISBN: 979-8-3503-4848-4, 13–18 November 2023, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380376>
8. Vetoshko I.P., Kravchuk S.O. Possibilities of improving the voice services quality in 5G networks. *Information and Telecommunication Sciences*. 2023. Vol. 14. № 2. P. 9–16, <https://doi.org/10.20535/2411-2976.2023.9-16>
9. Erik Dahlman Stefan Parkvall Johan Sköld 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology, Elsevier, 2018.
10. Ветошко І. П., Кравчук С. О. «Особливості протоколу управління радіоресурсами RRC в мережі 5G», International Scientific Symposium. *Innovation in modern science, Germany*. 2023. № SGE20-012. P. 99–108.
11. Verma D., Low C. L., El-saidny M. A. 5G NR Voice Solutions Overview and Deployment Guidelines. Network Performance Considerations. MediaTek, 16 p. (2021). <https://newsletter.mediatek.com/hubfs/MediaTek-5G-Voice-Solutions-Whitepaper-PDF5GNRSWP-0821.pdf>

Vetoshko I.P., Kravchuk S.O. INTERACTION AND COEXISTENCE OF LTE/NR RADIO ACCESS NETWORKS

It has been found that the development and implementation of fifth generation (5G) networks are becoming not only strategic directions for the development of the telecommunications sector, but also critical for improving the quality of communication and expanding the range of services for customers of mobile operators. One of the key aspects of 5G implementation is coexistence with previous technologies, in particular LTE (Long Term Evolution), to ensure efficient use of spectrum and smooth transition from previous standards to new ones [1–4]. It has been established that the development of LTE and NR (New Radio) networks is taking place in parallel, but given the limitations in spectrum use and the need to support various services, there is a need for optimal coexistence of these technologies [5–6]. The concepts of dynamic LTE/NR spectrum sharing have been established, which allow maintaining the full bandwidth and corresponding peak data rates for both technologies [7–8]. In particular, approaches to matching the data rates around LTE PSS/SSS, PBCH and CRS signals using the concept of reserved resources based on bit maps are highlighted. This allows for effective coordination of data transmission between LTE and NR networks, providing optimal quality of service for users [9–11].

It is determined that the introduction of the concepts of LTE/NR coexistence and coordination of data transmission around key signals is a step towards optimising mobile networks and increasing their efficiency, which will contribute to the further development of the telecommunications industry [9–11].

Key words: NR, 5G, LTE, Dual-Connectivity, gNB, eNB, single-TX, IMD, HARQ, TDD, FDD, LTE PSS/SSS, LTE CRS.